

Badanie stanu naprężeń w zespoleniu płytkowym kości piszczelowej

K. Koczułap, M. Pokój, G. Kaczmarski, T. Tański

^a Studenci Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych
email: krychu@poczta.rybnik.pl,

^b Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych,
email: tomasz.tanski@polsl.pl

Streszczenie: W pracy dokonano analizy naprężeń powstających podczas obciążania stabilizatora złamanej kości piszczelowej z założeniem siły występującej podczas chodzenia. Analizę przeprowadzono z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych przy użyciu oprogramowania Solid Works oraz Ansys.

Abstract: The paper analyzes the stress generated during the load stabilizer fractured tibia assumption forces occurring when walking. Analysis of the results was made using Finite Element Analysis using Solid Works and Ansys software.

Słowa kluczowe: MES, CAD, rozkład naprężeń, kość piszczelowa, stop Ti6Al4V.

1. WSTĘP

Zespolenie płytkowe jest produktem technicznym i z definicji składa się z elementów implantacyjnych, wykonanych z metalu biologicznie obojętnego. Jego głównym celem jest połączenie ze sobą końców złamanej kości i ustabilizowanie miejsca złamania. Dlatego też współczesne programy typu CAD wykorzystujące symulacje metodą elementów skończonych pomagają w doborze materiałów oraz określeniu prawidłowego miejsca umieszczenia zespolenia. Postęp w dziedzinie badań symulacyjnych pozwolił mieć wpływ na rehabilitację pacjentów ze złamaniami, nie tylko ze złamaniami kości piszczelowej ale także innych kości.

Zespolenie płytkowe złamań kości długich jest w dzisiejszych czasach bardzo często stosowane, ponieważ pomaga ono w szybszej rehabilitacji oraz lepszej stabilizacji złamanej kości a co za tym idzie szybszemu zrostowi. Osteosynteza czyli zabieg chirurgiczny polegający na zestawieniu odłamów kostnych w sposób prawidłowy, jest w ostatnich latach bardzo chętnie wykorzystywana podczas różnego typu złamań wśród sportowców. Dzięki

takiemu zabiegowi zawodnicy mogą szybciej wrócić do uprawiania swojej dyscypliny, nawet bez wyjmowania zespolenia płytkowego.

2. PRZEGLĄD LITERATUROWY

2.1. Modelowanie CAD

Systemy CAD (Computer Aided Design), czyli komputerowo wspomagane projektowanie, to narzędzia oraz techniki wspomagające prace w zakresie:

- projektowania,
- modelowania geometrycznego,
- obliczeniowej analizy MES,
- tworzenia i opracowania dokumentacji konstrukcyjnej, w tym struktury produktu i list kompletacyjnych.

Systemy CAD są też stosowane do opracowania dokumentacji technologicznej (karty i formularze operacji technologicznych wraz ze szkicami), przeznaczonej do obróbki na konwencjonalnych obrabiarkach. Istnieją także systemy CAE, CAM, CAP, CAQ, PPC które ułatwiają prace inżynierskie, wytwarzanie, sterowanie jakością oraz planowanie i sterowanie produkcją. Przykładowymi programami typu CAD są: SolidWorks, AutoCAD, NX [1].

Podstawowymi funkcjami systemów CAD są funkcje, które mogą być stosowane samodzielnie lub jako moduły większych pakietów systemu. Można je podzielić na cztery grupy:

- dane graficzne (reprezentowane przez dane graficznego jądra systemu, definiujące grafikę wektorową 2D i 3D),
- dane geometryczne (reprezentowane przez odpowiednie modele 2D (wymiar, rzuty, dane organizacyjne - najczęściej zlecenia) lub 3D (modele krawędziowe, powierzchniowe lub bryłowe),
- dane rysunkowe (odnoszą się do poszczególnych rysunków, zazwyczaj wykonawczych lub złożeniowych),
- dane modelu produktu (zawierają strukturę produktu, specyfikację list części i indeksów materiałowych, warianty produktu, specyfikacji zmian konstrukcyjnych, klasyfikatory geometryczne oraz technologiczne).

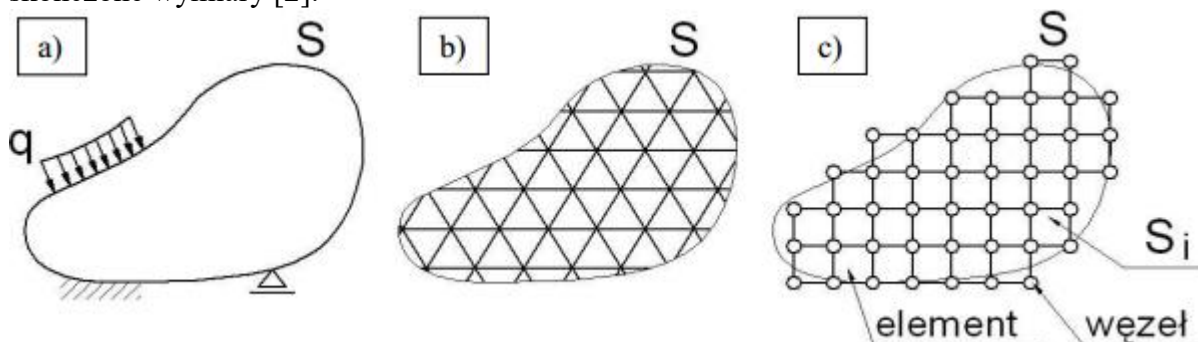
2.2. MES – Metoda elementów skończonych

MES jest dla inżyniera mechanika głównym narzędziem pracy w zakresie obliczeń wytrzymałościowych. Podstawy MES zaistniały ponad 25 lat temu. Użytkowanie tej metody było początkowo dosyć trudne. W dzisiejszych czasach, dzięki postępowi w dziedzinie oprogramowania oraz sprzętu, korzystanie z metody elementów skończonych jest prostsze i bardziej efektywne [2].

System metody elementów skończonych jest zaliczany do programów grupy CAD. Do najpopularniejszych systemów MES można zaliczyć: ABAQUS, ANSYS, NASTRAN, NISA, ADINA. Większość z nich potrafi odczytać zbiory danych rysunkowych, stworzone w systemach CAD, np. z programu Solid Works. Oprócz tego istnieją również programy, które generują dane z systemów CAD i przesyłają dane do systemów MES. Do programów tego typu należą: PATRAN, HYPERMESH, FEMAP, HOUDINI. Dzięki tym programom mamy możliwość tworzenia skomplikowanych siatek elementów przestrzennych [2].

Metoda elementów skończonych polega na zastąpieniu konstrukcji ciągłej, modelem nieciągłym zwanym strukturą. Dzielenie konstrukcji na elementy zostało nazwane dyskretyzacją lub idealizacją. Dyskretyzacji podlegają: obciążenia ciągłe (Rys.1), warunki

brzegowe i wewnątrz konstrukcji. Nazwa metody wynika z tego, że elementy mają małe, ale skończone wymiary [2].



Rys. 1. Dyskretyzacja modelu ciągłego: a) model geometryczny ciągły, b) model dyskretny idealny, c) model dyskretny obliczeniowy [2]

Rys. 1. Dyskretyzacja modelu ciągłego: a) model geometryczny ciągły, b) model dyskretny idealny, c) model dyskretny obliczeniowy [2]

Metoda MES posiada dużą ilość zalet takich jak [2]:

- zastosowanie w problemach liniowych i nieliniowych,
- uniwersalność,
- duża biblioteka elementów skończonych,
- możliwość otrzymania symetrycznej macierzy pasmowej.

Metoda elementów skończonych posiada również wady, do których możemy zaliczyć:

- aproksymację przemieszczeń wielomianami niskiego stopnia,
- konieczność zagęszczania w obszarach koncentracji naprężeń,
- uciążliwość w zagadnieniach przestrzennych [2].

Metodę elementów skończonych znalazła swoje zastosowanie w analizie stanu naprężeń wielu skomplikowanych układów mechanicznych. Dzięki metodzie MES można badać wytrzymałość konstrukcji, kinematykę, dynamikę i statykę, symulację odkształceń, naprężeń, ale również przepływy ciepła i cieczy. Znalazła ona również zastosowanie w bioinżynierii oraz medycynie [3].

2.3. Zespolenie płytkowe

Osteosynteza jest to zabieg chirurgiczny polegający na zestawieniu odłamów kostnych w sposób prawidłowy. Odłamy kostne mogą wywodzić się ze złamania lub przecięcia podczas osteotomii. Odłamy kostne mogą być zespolone za pomocą:

- Prętów.
- Łączników.
- Bolców.
- Płytek
- Śrub.

Wyróżnić można osteosyntezę zewnętrzną oraz wewnętrzną. Zespolenie wewnętrzne zawiera wszystkie elementy zespolenia zakryte skórą, natomiast w zespoleniu zewnętrznym główny element zespalający znajduje się na powierzchni skóry[4].

2.3.1. Elementy zespolen płytkowych

Płytki zespalające

Wyróżnić można cztery grupy płytek stosowanych podczas zabiegów osteosyntezy [5]. Do płytek zespalających należą:

- Płytki kompresyjne.
- Płytki rekonstrukcyjne.
- Płytki neutralizujące.
- Płytki wspierające.

Płytki kompresyjne

Płytki kompresyjne używane są podczas złamań stabilnych w obecności naprężeń. Często stosowane są wraz z wkrętami otulającymi. W płytkach kompresyjnych dynamicznych otwory są owalne oraz zawierają podcięcia, których zadaniem jest przyspieszenie gojenia złamanej kości poprzez lepszy transport krwi do miejsca zespolenia zmniejszając pole powierzchni zakrytej kości [5].



Rys. 2. Płytko kompresyjna stosowana przy złamaniu kości piszczelowej[9]

Rys. 2. Płytko kompresyjna stosowana przy złamaniu kości piszczelowej[9]

Płytki rekonstrukcyjne

Płytki rekonstrukcyjne służą w celu zastąpienia kości w przypadku jej braku i połączenia odłamów znajdujących się daleko od siebie. Płytko ta cechuje się możliwością dostosowania do pacjenta w sposób odzwierciedlający prawdziwe ułożenie kości. Płytki te mogą zostać podczas zabiegu zgięte, wyprofilowane lub skrócone [5].



Rys. 3. Płytko rekonstrukcyjna żuchwy[9]

Rys. 3. Płytko rekonstrukcyjna żuchwy[9]

Płytki wspierające

Płytki wspierające noszą także nazwę płytek kształtowych. Stosowane są w przypadkach których kość wykazuje brak stabilizacji pod wpływem nacisku. [7].

Wkręty

Wkręty zwane także śrubami są jedynym z najczęściej spotykanych elementów stosowanych podczas osteosyntezy.

Wyróżnia się cztery grupy śrub do osteosyntezy:

- Gąbczaste – używane do kości gąbczastej, nie posiadają one gwintu w części trzonowej
- Korowe – posiadają gwint na całej długości śruby
- Drażone – posiadają otwór na całej długości wkrętu, ułatwia to precyzyjne umiejscowienie śruby w kości. Stosuje się ją podczas osteosyntezy z użyciem drutów Kirschner'a
- Specjalizowane – śruby Herbert'a oraz śruby Acutrack

2.3.2. Materiały wykorzystywane na elementy zespolenia

Istnieje duża grupa materiałów metalowych stosowanych w inżynierii biomedycznej. Ze względu na coraz większy rozwój implantologii oraz wzrost zapotrzebowania, materiały te muszą spełniać restrykcyjne wymagania[8].

Materiały stosowane na elementy zespolenia powinny charakteryzować się:

- Biofunkcjonalnością.
- Biotolerancją.
- Biozgodnością.
- Jednorodnością składu chemicznego.
- Określonymi własnościami mechanicznymi.
- Brakiem tendencji do tworzenia zakrzepów.

Stal nierdzewna

Stalą stosowaną na elementy zespolenia jest stal objęta normą PN ISO 5132-1. Najczęściej stosowaną jest stal 316L. Jest to stal austenityczna o bardzo wysokiej odporności na korozję. Zapewnia ona biokompatybilność z organizmem człowieka dzięki czemu może być stosowane podczas implantacji długotrwałych [8].

Stale chromowo niklowe są jednymi z najtańszych biomateriałów dlatego są powszechnie używane podczas zespolenia płytkowych.

Tytan i jego stopy

Tytan i jego stopy są obecnie najlepszymi biomateriałami ze wszystkich materiałów metalowych. Posiadają one bardzo dobre własności mechaniczne oraz wysoką biokompatybilność. W porównaniu ze stalą austenityczną i stopami kobaltu posiadają najniższy moduł Younga. Wysoka biotolerancja powoduje występowanie procesu osteointegracji pomiędzy kością a implantem. Wadą implantów ze stopów tytanu są koszty produkcji, które są wyższe w porównaniu z innymi materiałami ze względu na złożone procesy wytwarzania.

Stopy stosowane w bioinżynierii można podzielić na trzy grupy:

- Stopy jednofazowe α
- Stopy dwufazowe $\alpha + \beta$

— Stopy jednofazowe β

Najczęściej stosowanym stopem tytanu jest stop dwufazowy Ti-6Al-4V którego skład chemiczny określa norma PN-EN ISO 5832-3:2012 [8].

Stopy kobaltu

Stopy na osnowie kobaltu charakteryzują się dobrymi własnościami mechanicznymi i wysokiej biotolerancji. Biotolerancja wynika z występowania warstwy pasywnej głównie tlenku chromu. Dlatego też przy ich implantacji należy uważać by ich nie uszkodzić.

Skład chemiczny stopów kobaltu jak i ich obróbkę oraz własności użytkowe zawiera norma ISO 5832-4:2014. Stopy kobaltu powoli przestają być używane na rzecz stopów tytanu [8].

2.4. Kość piszczelowa

Kość piszczelowa należy do kości długich i jest jedną z kości kończyny dolnej. Kość piszczelowa jest drugą co do długości kością w organizmie ludzkim i składa się z dwóch końców, bliższego i dalszego, trzech brzegów i długiego trójkątnego trzonu z trzema powierzchniami przyśrodkową, tylną i boczną (Rys.4), położonymi kolejno: pierwsza – niżej guzowatości kości piszczelowej, druga – w tylnej części kości, trzecia – w bocznej. Do tych powierzchni przyłączone są liczne mięśnie [10].



Rys. 4. Kość piszczelowa[10]

Rys. 4. Kość piszczelowa[10]

Koniec bliższy – głowa kości piszczelowej ma kształt kłykcia bocznego i przyśrodkowego z powierzchniami wchodzącymi w skład stawu kolanowego. Między kłykcami znajduje się wyniosłość międzykłykciowa z guzkami bocznym i przyśrodkowym.

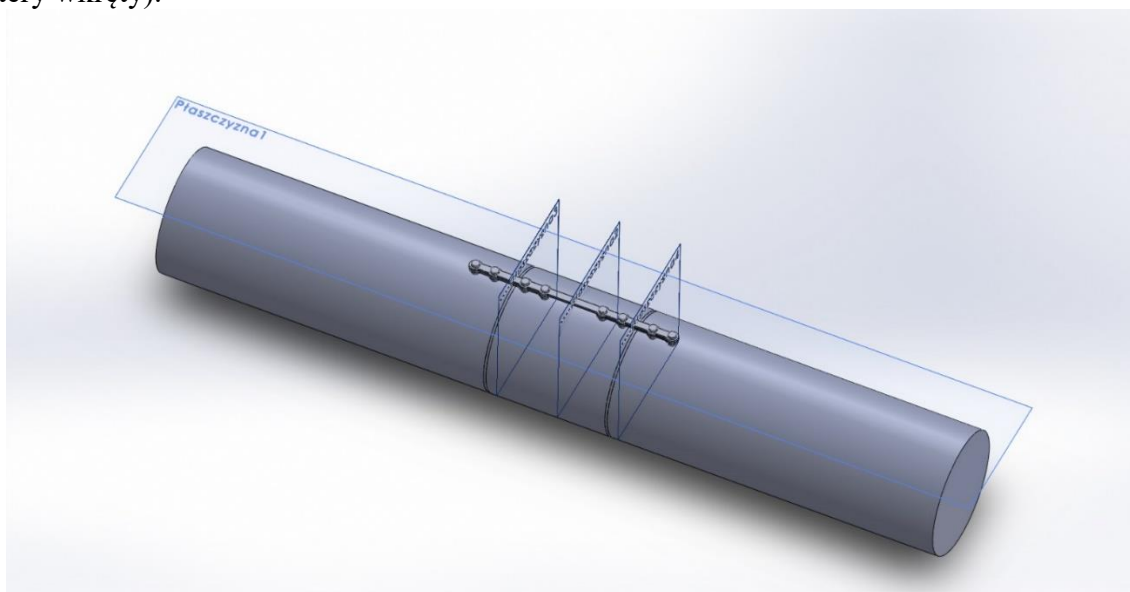
U podstawy kłykcia bocznego na jego tylno-bocznej powierzchni jest powierzchnia stawowa strzałkowa, łącząca z głową strzałki. Brzeg przedni kości piszczelowej i jej powierzchnia przyśrodkowa pokryte są tylko skórą i są dobrze przez nią wyczuwalne. Po stronie bocznej dalszej kości piszczelowej znajduje się wcięcie strzałkowe. W końcu dalszym kości znajduje się powierzchnia stawowa dolna łącząca z kością skokową stopy [10].

3. METODYKA BADAŃ

W pracy zamodelowano przypadek stabilizacji złamanej kości piszczelowej. Model trójwymiarowy wygenerowany został za pomocą oprogramowania Solid Works.

Model kości piszczelowej ma wymiary 320mm długości i 50mm średnicy. Miejsce złamania przyjęto w centralnym punkcie modelu.

Następnie stworzono model stabilizatora składający się z ośmiu wkrętów łączących o średnicy 3mm i wysokości 9mm (wkręcone w kość na głębokość 4mm) połączonych płytkami zespalającymi (jedna płytka zespalająca wszystkie osiem wkrętów o długości 86mm i grubości 1mm oraz dwie dodatkowe płytki o długości 33,6mm i grubości 1mm zespalające po cztery wkręty).



Rys. 5. Model CAD stabilizatora złamanej kości.

Rys. 5. Model CAD stabilizatora złamanej kości.

Podczas tworzenia modelu i analizy MES przyjęto następujące uproszczenia:

- Model kości w formie walca,
- Modele wkrętów łączących w formie walców, bez gwintów,
- Założono idealne połączenie pomiędzy kością, a stabilizatorem,
- Przyjęto idealnie gładką powierzchnię złamania.

Stabilizator wykonany jest ze stopu tytanu Ti6Al4V, cechujący się własnościami przedstawionymi w tabelicy 1.

Tab. 1. Własności stopu tytanu TI6Al4

Tab. 1. Własności stopu tytanu TI6Al4

Własności	Wartość
Moduł Young'a	114GPa
Wytrzymałość na ściskanie	970 Mpa
Wytrzymałość na rozciąganie	1860 Mpa
Wytrzymałość zmęczeniowa	240 Mpa
Współczynnik Poisson'a	0,342
Twardość	349 HV
Skład chemiczny	— Al.: 6%, — Fe: <0,25%, — O: < 0,2%, — Ti: 90%, — V: 4%

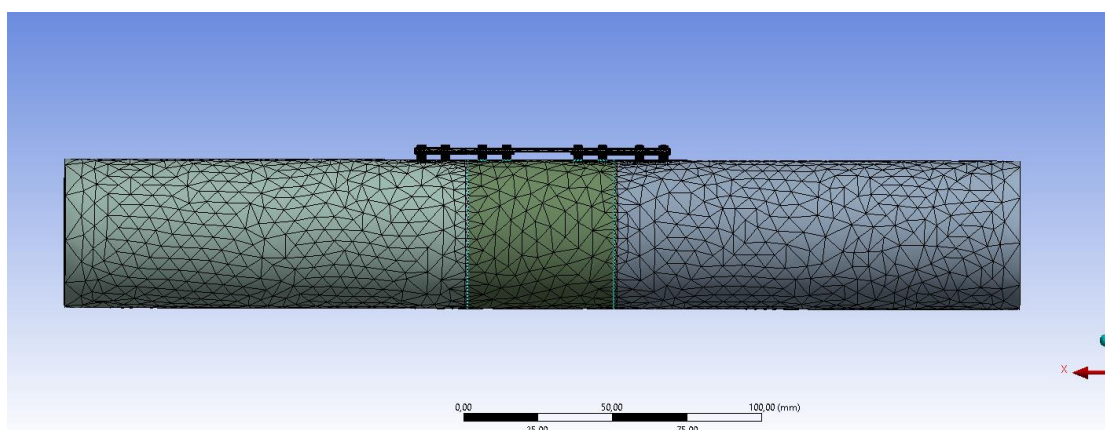
Tab. 2. Własności biomechaniczne kości ludzkiej

Tab. 2. Własności biomechaniczne kości ludzkiej

Własności	Wartość
Moduł Young'a	3,14 GPa
Wytrzymałość na ściskanie	159 MPa
Wytrzymałość na rozciąganie	107 MPa
Wytrzymałość zmęczeniowa	35 MPa
Wytrzymałość na zginanie	160 MPa
Wytrzymałość na skręcanie	53 MPa

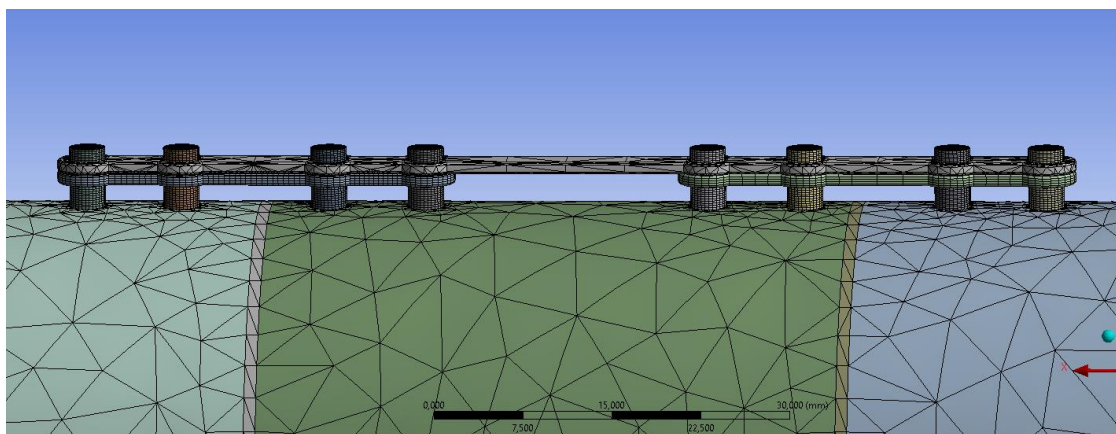
Analiza przeprowadzona przy pomocy oprogramowania Ansys obejmowała symulację zmian naprężeń i przemieszczeń podczas obciążania zespolonej kości.

Pierwszym krokiem był import wykonanego modelu i załadowanie go do modułu Mechanical. Następnie dokonano podziału modelu na elementy skończone (rys. 2 - 4).



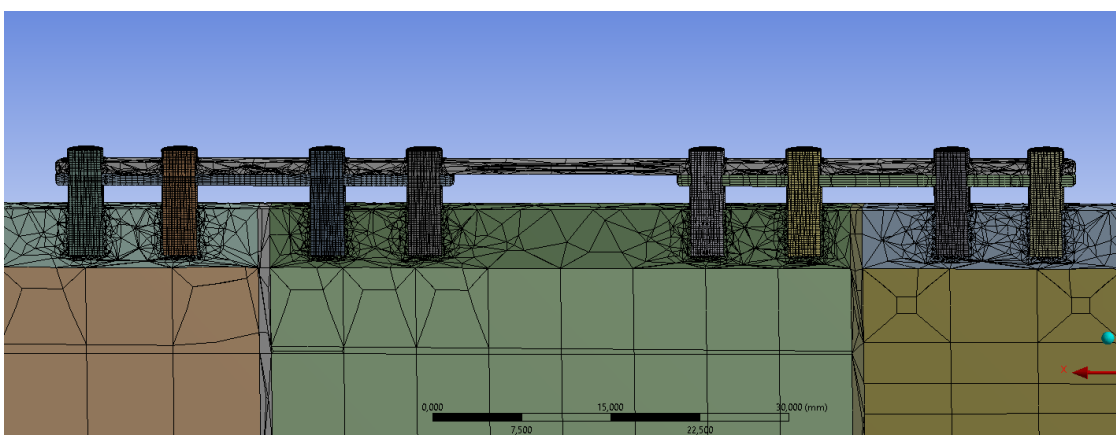
Rys. 6. Model po dokonaniu podziału na elementy skończone

Rys. 6. Model po dokonaniu podziału na elementy skończone



Rys. 7. Model po dokonaniu podziału na elementy skończone

Rys. 7. Model po dokonaniu podziału na elementy skończone

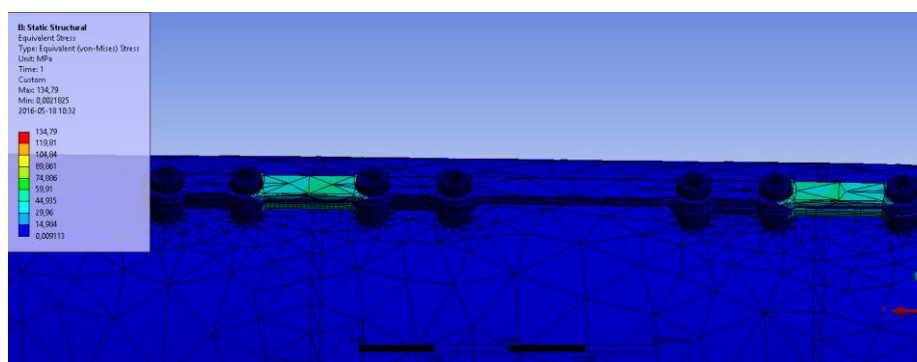


Rys. 8. Model po dokonaniu podziału na elementy skończone (widok w przekroju)

Rys. 8. Model po dokonaniu podziału na elementy skończone (widok w przekroju)

Następnym krokiem było umiejscowienie podpór. Punkt podparcia ustawiono na dolnej powierzchni modelu kości, a punkt obciążenia zadano na powierzchni górnej. Nacisk ustalono na 400N.

4. ANALIZA NAPRĘŻEŃ I WYNIKI

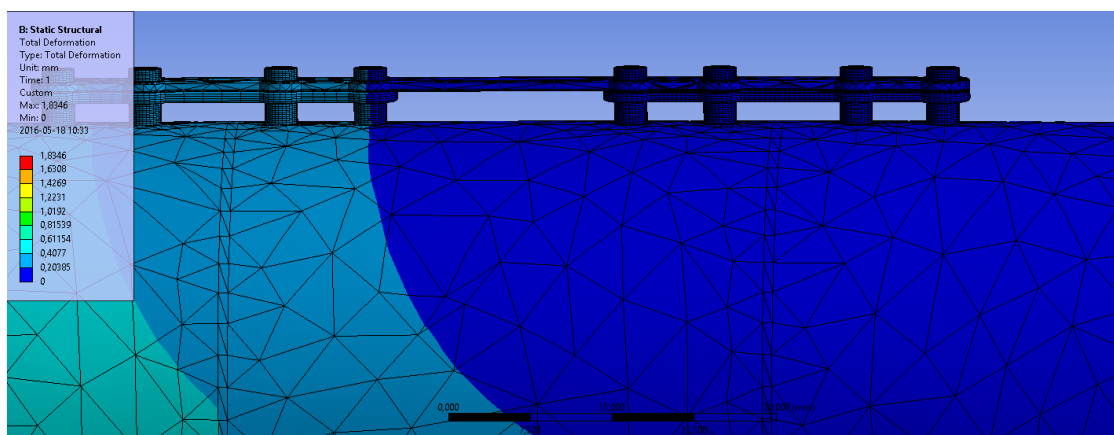


Rys. 9. Zobrazowanie naprężeń zredukowanych von Misesa występujących na stabilizatorze

Rys. 9. Zobrazowanie naprężeń zredukowanych von Misesa występujących na stabilizatorze

Tab. 3. Wartości naprężeń zredukowanych von Misesa występujących na stabilizatorze
Tab. 3. Wartości naprężeń zredukowanych von Misesa występujących na stabilizatorze

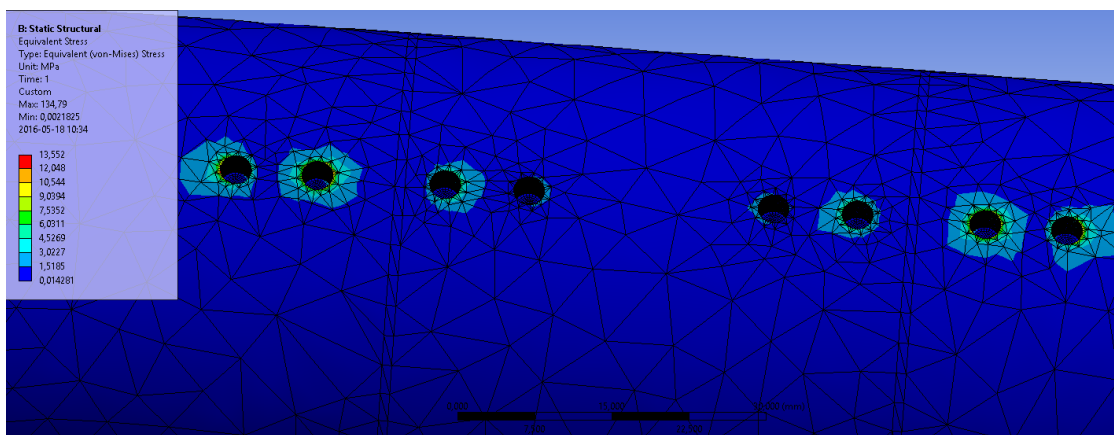
	Wartości naprężeń [MPa]
Maksymalne	134,79
Średnie	59,91
Minimalne	0,009113



Rys. 10. Zobrazowanie przemieszczeń występujących na stabilizatorze
Rys. 10. Zobrazowanie przemieszczeń występujących na stabilizatorze

Tab. 4. Wartości przemieszczeń występujących na stabilizatorze
Tab. 4. Wartości przemieszczeń występujących na stabilizatorze

	Wartości przemieszczeń [mm]
Maksymalne	1,8346
Średnie	0,81539
Minimalne	0



Rys. 11. Zobrazowanie naprężeń zredukowanych von Misesa występujących w miejscach wkręcenia stabilizatora w kość
Rys. 11. Zobrazowanie naprężeń zredukowanych von Misesa występujących w miejscach wkręcenia stabilizatora w kość

Tab. 5. Wartości naprężeń zredukowanych von Misesa występujących w miejscach wkręcenia stabilizatora w kość

Tab. 5. Wartości naprężeń zredukowanych von Misesa występujących w miejscach wkręcenia stabilizatora w kość

	Wartości naprężeń [MPa]
Maksymalne	13,552
Średnie	6,0311
Minimalne	0,014281

WNIOSKI

Przyjęty model umożliwia ocenę przenoszenia siły przez zespolenie płytkowe, występowania miejsc najbardziej wyężonych, a przez to możliwość przewidywania miejsc występowania złamań.

Biorąc pod uwagę wyniki uzyskane podczas analizy można wywnioskować, iż materiał, z którego wykonano stabilizator złamanej kości jest na tyle wytrzymały, aby bez przeszkód przyjmować obciążenia do 400N. Naprężenia zarówno w kości jak i w stabilizatorze są małe (poniżej 30MPa, gdzie wartość ta to próg dynamicznego niszczenia kości).

Należy wziąć pod uwagę, że uzyskane wyniki dotyczą modelu z pewnymi uproszczeniami.

Wykonane badania symulacyjne pozwalają prognozować zachowanie kości i materiałów zespolenia płytkowego, co umożliwia predykcję własności materiałów na zespolenia płytkowe.

LITERATURA

- [1] M. Dacko, W. Borkowski, S. Dobrociński, M. Wieczorek, Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji; Arkady, Warszawa 1994
- [2] Łączek S.: Wprowadzenie do systemu elementów skończonych ANSYS (Ver. 5.0 i 5-ED)
- [3] Dobosz A., Panek H., Dobosz K., Zastosowanie metod elementów skończonych do analizy naprężeń w twardych tkankach zębów. Dent. Med. Probl.
- [4] Gutkowski. P, Ćwieka K., Adamczyk K., Kwaśniak P., Wytrzymałość minipłytek tytanowych wykorzystywanych w leczeniu złamań kąta żuchwy, Czas. Stomatol., 2010, 63, 12,749-755
- [5] Żuk T., Dziak A., Gusta A., Podstawy ortopedii i traumatologii. Warszawa: PZWL, 1980
- [6] <http://www.mikromed.pl>
- [7] <http://iim.p.lodz.pl/media/materialy/mat-kier-MiBM-AiR-PiP-Trans/Cwiczenie%2013.pdf>
- [8] Łączek S., Modelowanie i analiza konstrukcji w systemie MES ANSYS v.11, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2011.
- [9] Kromka-Szydek M., Wrona M., Jędrusik-Pawłowska M., Analiza wytrzymałościowa systemu UNILOCK 2,4 stosowanego w chirurgii szczękowo-twarzowej, Modelowanie Inżynierskie nr 47, ISSN 1896-771X
- [10] Nowacki. J, Dobrzański. L, Gustavo. F, Implanty sródpiszkowe w osteosyntezie kości długich

