



*Weronika Czech,
Karolina Machnia,
Paulina Sośniak*

Politechnika Śląska, Zabrze
Katedra Biomechatroniki, Wydział Inżynierii Biomedycznej

WYTRZYMAŁOŚCIOWA ANALIZA MULTIKĄTOWEJ PROWADNICZY STOSOWANEJ W CHIRURGII KOSTNEJ ZA POMOCĄ ANALIZY MES

Streszczenie (abstrakt): W pracy przeprowadzono analizę wytrzymałościową nowej postaci konstrukcyjnej multikątowej prowadnicy umożliwiającej wykonanie otworu pod zadany kąt ($\varphi = \pm 15^\circ$). Obliczenia przeprowadzono w celu wytypowania najkorzystniejszego wariantu materiałowego, z którego prowadnica powinna zostać wykonana. Weryfikację geometrii oraz dobór materiału narzędzia przeprowadzono na podstawie wyników uzyskanych za pomocą MES. Do wykonania poszczególnych elementów prowadnicy zaproponowano zarówno materiały polimerowe (PET, PP, PTFE) jak i metalowe (TiAlV, CrNiCo).

Słowa kluczowe: chirurgia kostna, multikątowa prowadnica, analiza wytrzymałościowa, MES

STRENGTH ANALYSIS OF A MULTI-ANGLE GUIDE USED IN BONE SURGERY USING FEM ANALYSE

Abstract: The study carried out a strength analysis of a new construction form of a multi-angle guide enabling the hole to be made at a selected angle ($\varphi = \pm 15^\circ$). The calculations were carried out in order to select the best material variant from which the guide should be made. Geometry verification and selection of tool material was carried out on the basis of results obtained using MES. Polymer (PET, PP, PTFE) and metal (TiAlV, CrNiCo) materials were proposed for the individual elements of the guide.

Keywords: bone surgery, multi-angle guide, strength analysis, FEM

Wstęp

Obecnie w chirurgii kostnej stosowane są różne rodzaje implantów do osteosyntezy. Charakteryzują się one dopasowanym kształtem do miejsca złamania^{1,2}. Przerwanie ciągłości

¹ BHH MIKROMED, katalog: 2.01 DHS/DCS, 2018.

² MEDGAL orthopaedic implants & instruments, katalog: Płytki kostne – system 2.0.

tkanki kości długich, np. ramiennej lub udowej, szczególnie przy nasadzie, wymaga zastosowania płytki kostnej o anatomicznej geometrii, której mocowanie odbywa się za pomocą wkrętów kostnych usytuowanych pod różnym kątem względem osi kości^{3,4}. Aktualnie stosowane rodzaje prowadnic chirurgicznych umożliwiają precyzyjne uzyskanie otworu w kości jedynie pod stałym kątem $\phi = 90^\circ$. Takie usytuowanie wkrętu kostnego nie jest korzystne, gdyż powoduje ograniczenie widoczności części pola roboczego przez geometrię implantu lub sposób jego mocowania^{5,6}. Innym problemem wynikającym z tego typu mocowania płytek są również odłamy kostne. Nie w każdym przypadku możliwe jest ich zespolenie za pomocą wkrętów usytuowanych prostopadle⁷. Dodatkowo, o doborze materiałów stosowanych do wytwarzania narzędzi chirurgicznych decydują warunki ich użytkowania. Proces eksploatacji instrumentarium medycznego powinien spełniać wymogi bezpieczeństwa, funkcjonalności oraz niezawodności. Właściwy dobór materiałów powinien zapewnić odporność korozyjną w warunkach użytkowania oraz odpowiedni zespół własności mechanicznych⁸. Tworzywa sztuczne i metalowe stosowane na tego typu wyroby powinny charakteryzować się m.in. łatwością sterylizacji bez zmian własności lub kształtu.

Stąd też autorzy pracy zaproponowali nowy rodzaj prowadnicy, za pomocą której możliwe będzie wiercenie otworów, a tym samym wprowadzenie wkrętów kostnych mocujących płytkę, pod kątem $\phi = \pm 15^\circ$. Takie rozwiązanie zapewni precyzyjne otrzymanie otworu podczas wiercenia, zwiększając możliwość stosowania płytek w przypadku bardziej skomplikowanych złamań. Do opracowania odpowiedniej geometrii narzędzia oraz doboru rodzaju materiału, z którego prowadnica zostanie wykonana, koniecznym było przeprowadzenie analizy wytrzymałościowej z wykorzystaniem metody elementów skończonych, na podstawie której wyznaczono stan przemieszczeń, odkształceń i naprężeń zredukowanych powstałych w wyniku pracy narzędzia. Uzyskane w ten sposób wyniki umożliwiły optymalizację cech konstrukcyjnych i materiałowych proponowanej postaci prowadnicy multikątowej.

Metodyka badań

W pierwszym etapie projektu na podstawie analizy danych literaturowych dostępnych na rynku rozwiązań konstrukcyjnych prowadnic zaproponowano trzy własne postacie kon-

³ Giles R. Scuderi, Alfred J., Jr. Tria, *Surgical Techniques in Total Knee Arthroplasty*, Springer Science & Business Media, 2006, p. 83-105.

⁴ Neal S. ElAttrache, Christopher D. Harner, Raffy Mirzayan, Jon K. Sekiya, *Surgical Techniques in Sports Medicine*, Lippincott Williams & Wilkins, 2007, p. 325-346.

⁵ E. Bishop, I. Handel, D. Clements, J. Ryan, *Sequential drilling and drill angulation reduce the accuracy of drill hole start location in a synthetic bone model*, „Vet Rec.” 2019.

⁶ V. Brioschi, J. Cook, G. Arthurs, *Can a surgeon drill accurately at a specified angle?*, „Vet Rec Open.” 2016.

⁷ R.K. Pandey, S.S. Panda, *Drilling of bone: A comprehensive review*, „J Clin Orthop Trauma”, 2013, p. 15-30.

⁸ C.J. Shales, L. White, S.J. Langley-Hobbs, *Sacroiliac luxation in the cat: defining a safe corridor in the dorsoventral plane for screw insertion in lag fashion*, „Vet Surg.” 2009.

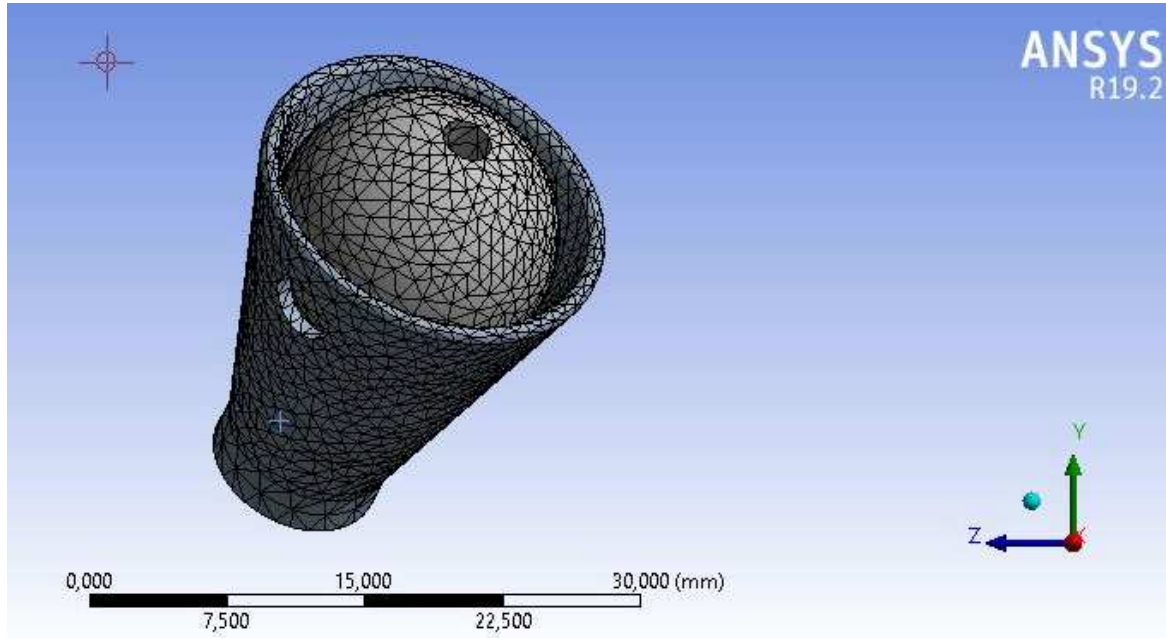
strukcyjne spośród których, po wstępnej weryfikacji ich przydatności zaproponowano narzędzie zbudowane z dwóch części, tj. lejka wielokrotnego użytku, wykonanego z materiału metalowego umożliwiającego stałe przymocowanie narzędzia do płytki za pomocą gwintu, oraz kulki jednorazowego użytku wykonanej z materiału polimerowego umożliwiającej precyzyjne ustawienie kąta w zakresie $\varphi = \pm 15^\circ$ za pomocą odpowiedniej blokady. Model takiej prowadnicy wykonano w programie Inventor – rys. 1.



Rys. 1. Model geometryczny multikątowej prowadnicy.

Tak przygotowane modele geometryczne lejka i kulki zostały zaimportowane do środowiska Ansys Workbench 19.2, który pozwolił na przeprowadzenie kompleksowej symulacji komputerowej. W pierwszym etapie analizy modele poddano dyskretyzacji za pomocą elementu skończonego typu SOLID Hex 20 stosowanych przy analizach brył przestrzennych. Zastosowanie tego typu elementu umożliwia przeprowadzenie analizy wytrzymałościowej w zakresie zarówno sprężystym, jak i plastycznym – rys. 2. Liczba ele-

mentów układu wynosiła 9889, z kolei węzłów – 18838. Zastosowanie wielkości elementów skończonych umożliwiły uzyskanie modeli dyskretnych, w których parametr skośności mieści się w zakresie 0 – 0,5. Świadczy to o dobrej jakości wygenerowanej siatki.



Rys. 2. Zdyskretyzowany model multikątowej prowadnicy do analizy MES.

Dla przeprowadzenia obliczeń wytrzymałościowych istotnym było nadanie odpowiednich warunków początkowych i brzegowych, które w sposób prawidłowy odzwierciedlały warunki występujące w obiekcie rzeczywistym, tj.:

- wszystkie stopnie swobody odebrano w płaszczyźnie podstawy lejka, odzwierciedlając tym samym sposób jego stałego mocowania za pomocą gwintu w otworze płytki,
- założono zmianę kąta w zakresie $\pm 15^\circ$ z krokiem całkowania co 1° pomiędzy osią otworu kulki a osią symetrii lejka,
- siła F , która symulowała kontakt wiertła z kulką przyłożona została w sposób odzwierciedlający rzeczywisty proces wiercenia, tj. $F = 10 \text{ N}$ w przypadku kąta 0° oraz $F = 14 \text{ N}$ w przypadku kąta 15° ,
- cechy materiałowe dla kulki nadano zgodnie z właściwościami mechanicznymi tworzyw sztucznych, tj. PET, PP i PTFE; z kolei dla lejka zgodnie z właściwościami mechanicznymi metalowych, tj. stop Ti6Al4V i stop CrNiCo – tab. 1.

Tabela 1. Wybrane własności mechaniczne materiałów polimerowych i metalowych wytypowanych do analizy MES.

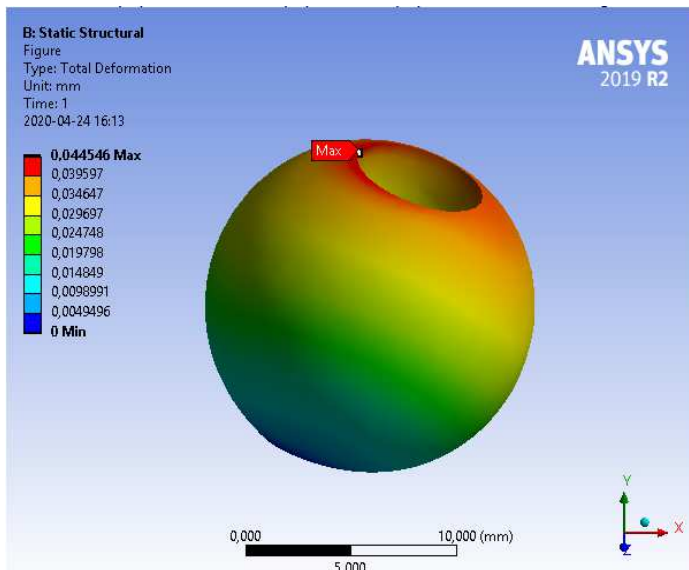
	PET	PP	PTFE	CrNiCo	Ti6Al4V
R_{p0.2}, MPa	52,4	26,2	20,7	821	780
R_m, MPa	57,4	29,9	26,7	965	860
E, GPa	1	1	1	210	120
ν, b.w.	0,36	0,35	0,46	0,3	0,3

Wyniki

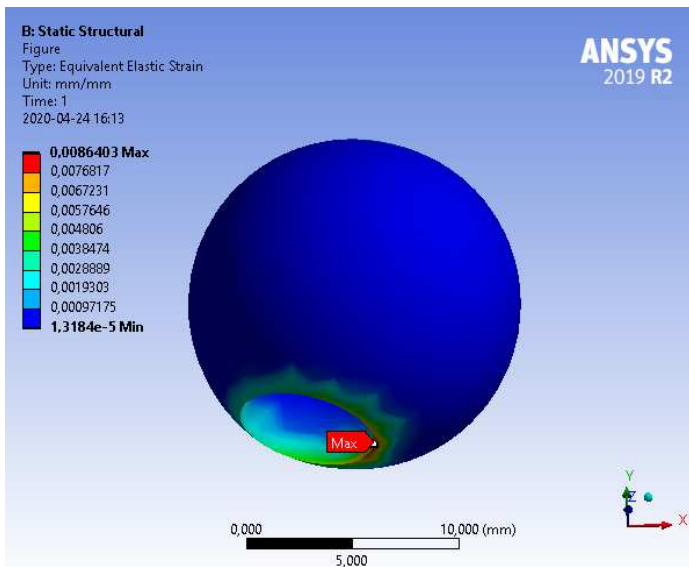
Analizę numeryczną multikątowej prowadnicy przeprowadzono za pomocą metody elementów skończonych (zwanej również metodą dyskretyzacji układów ciągłych) w celu wytypowania najkorzystniejszego wariantu materiałowego, z którego zostanie ona wykonana. Uzyskane wartości przemieszczeń, odkształceń i naprężeń zredukowanych, wyznaczono według hipotezy Hubera-Misses-Henckiego. Wstępna ocena uzyskanych wyników wykazała, że największe wartości uzyskano podczas przyłożenia sił symulujących rzeczywisty proces wiercenia w kości przy maksymalnym kącie – $\varphi = 15^\circ$ niezależnie od analizowanego wariantu materiałowego. I tak, największe wartości przemieszczeń w przypadku materiałów PET i PP wyniosły odpowiednio: $u_{\max} = 0,045$ oraz $u_{\max} = 0,053$ mm, co pozwoli na utrzymanie stałego kąta podczas wiercenia, a tym samym wykonanie precyzyjnego otworu w kości. Z kolei wyniki przemieszczeń dla PTFE były większe od pozostałych i wyniosły $u_{\max} = 0,102$ mm. Maksymalne wartości odkształcenia w przypadku PET, PP i PTFE kształtowały się w przedziale $\epsilon_{\max} = 0,86 - 2\%$ i zlokalizowane były w miejscu bezpośredniego kontaktu wiertła z kulką. Uzyskane wartości maksymalnych naprężeń zredukowanych w tych strefach niezależnie od analizowanego rodzaju materiału polimerowego mieściły się w zakresie $\sigma_{\max} = 9,35 - 9,44$ MPa. Na rysunkach 3, 4 i 5 przedstawiono uzyskane przykładowe wyniki maksymalnych przemieszczeń, odkształceń oraz naprężeń zredukowanych dla materiałów PET, PP oraz PTFE.

Tabela 2. Wartości przemieszczeń, odkształceń i naprężeń zredukowanych dla analizowanych materiałów.

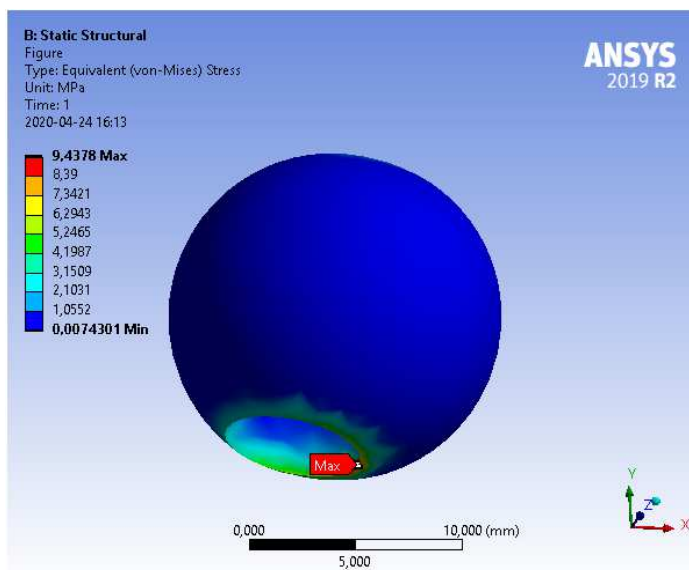
Parametr	PET	PP	PTFE
u_{max}, mm	0,045	0,053	0,102
ε_{max}, %	0,86	1,03	2,00
σ_{max}, MPa	9,44	9,37	9,35



a)

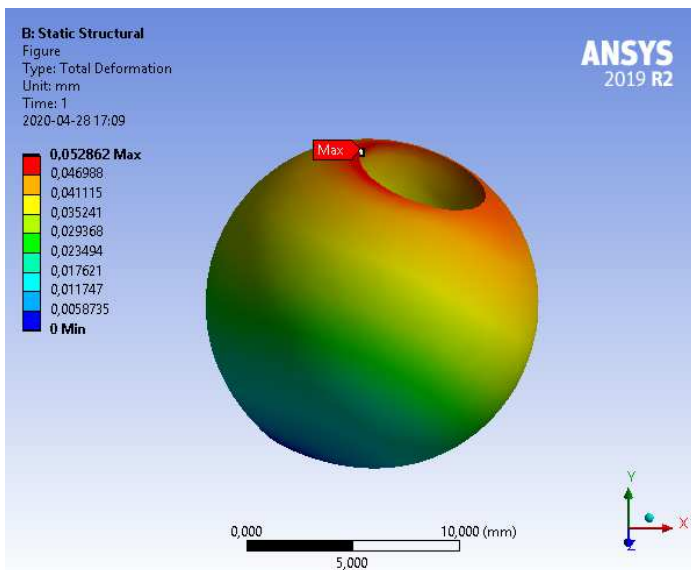


b)

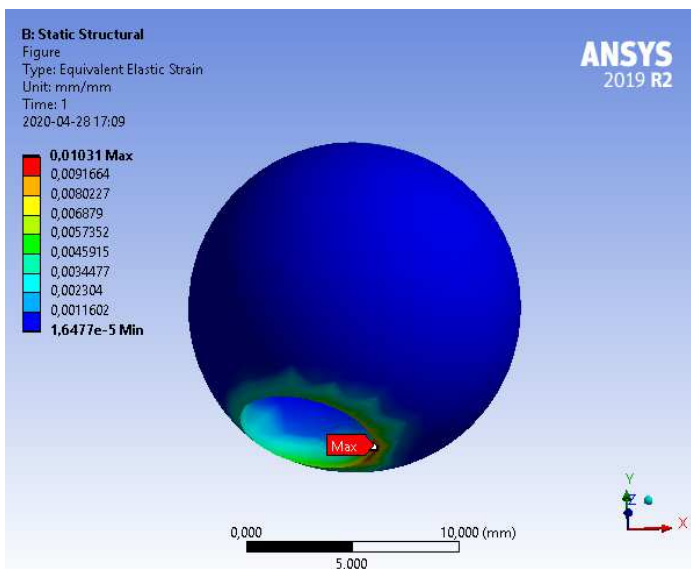


c)

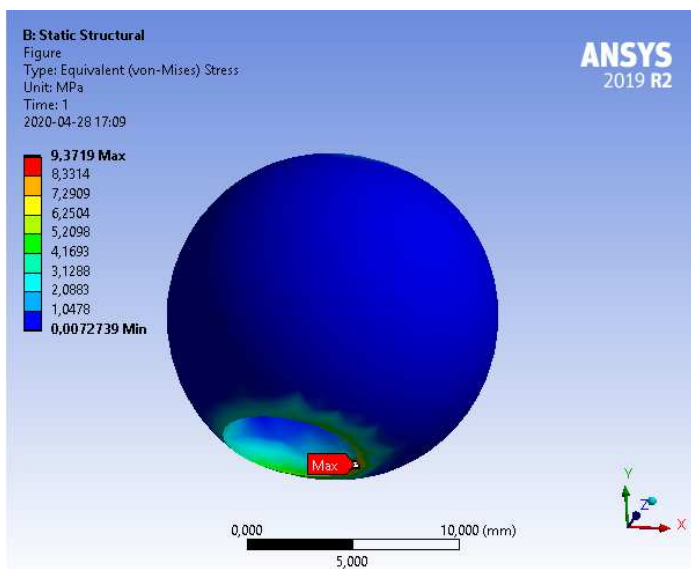
Rys. 3. Analiza wytrzymałościowa kulki:
a) przemieszczenia,
b) odkształcenia,
c) naprężenia zredukowane dla materiału PET w programie ANSYS.



a)

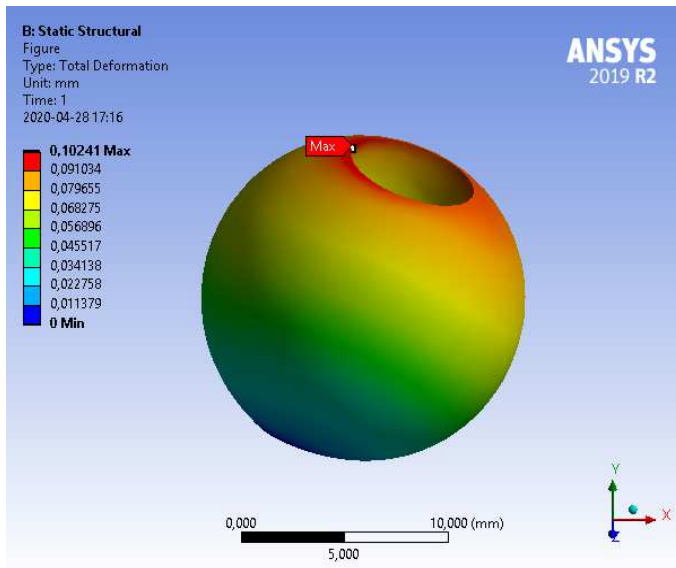


b)

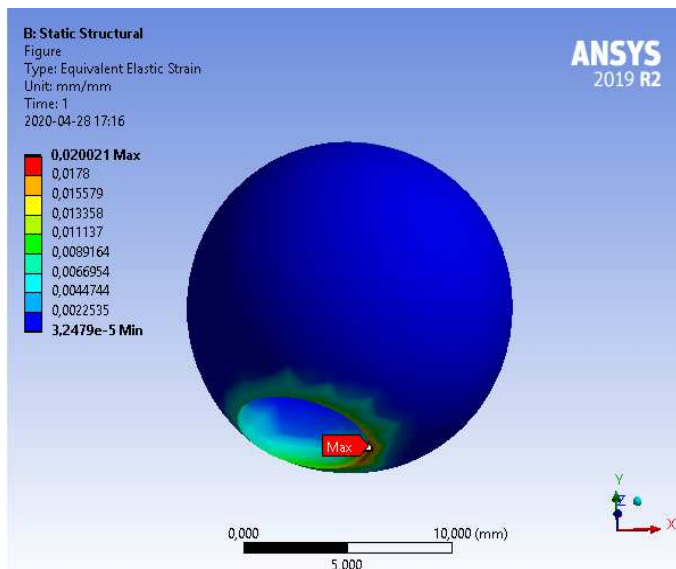


c)

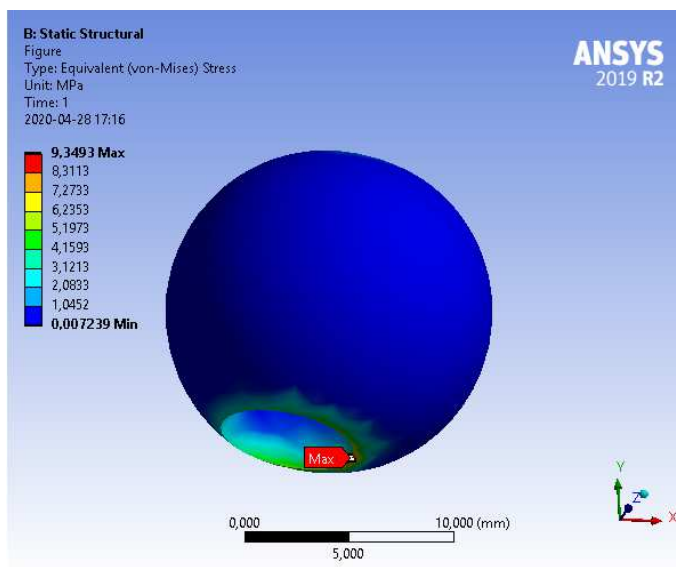
Rys. 4. Analiza wytrzymałościowa kulki:
 a) przemieszczenia,
 b) odkształcenia,
 c) naprężenia zredukowane dla materiału PP w programie ANSYS.



a)



b)



c)

Rys. 5. Analiza wytrzymałościowa kulki:
a) przemieszczenia,
b) odkształcenia,
c) naprężenia zredukowane dla materiału PTFE w programie ANSYS.

Podsumowanie i wnioski

Podczas zabiegu zespolenia kości długich bardzo ważne jest wykonanie precyzyjnego otworu pod określonym kątem. Dostępne na rynku prowadnice chirurgiczne przyczyniły się do opracowania nowej postaci multikątowej prowadnicy stosowanej w chirurgii kostnej, która umożliwiła precyzyjne wykonanie otworu w kości pod zadanym kątem w zakresie $\varphi = \pm 15^\circ$. Zaproponowane w pracy rozwiązanie konstrukcyjne składa się z metalowego lejka wielokrotnego użytku oraz jednorazowej wkładki – polimerowej kulki z otworem znajdującym się wzdłuż jej osi symetrii, której odpowiednie pozycjonowanie umożliwia ułożenie wiertła pod zadanym kątem. Podczas procesu wiercenia otworu w kości może dojść do zniekształcenia otworu znajdującego się w kulce, w wyniku bezpośredniego oddziaływania wiertła. Stąd też bardzo ważny jest odpowiedni dobór materiału o właściwościach wytrzymałościowych umożliwiających przeniesienie obciążenia.

W pracy przeprowadzono analizę wytrzymałościową zaproponowanego modelu multikątowej prowadnicy, w celu wytypowania najkorzystniejszego wariantu materiału polimerowego, z którego powinna zostać wykonana kulka umożliwiająca precyzyjne ułożenie wiertła oraz wykonanie otworu. Materiały, które wytypowano do badań to polimery stosowane w medycynie, tj.: PP, PET oraz PTFE. Materiały te posiadają odpowiednie właściwości mechaniczne, spełniają również wymagania dotyczące zastosowania ich na instrumentarium chirurgicznego oraz cechują się dobrą biotolerancją w środowisku tkankowym, łatwością sterylizacji medycznej nie wpływającą na właściwości lub zmianę kształtu oraz są stosunkowo tanie. Przeprowadzona analiza wytrzymałościowa z wykorzystaniem wymienionych materiałów miała na celu wytypowanie polimeru o najkorzystniejszych właściwościach mechanicznych umożliwiających wykonanie kulki, która nie ulegnie deformacji podczas procesu wiercenia, a tym samym umożliwi precyzyjne wykonanie otworu w kości. Spośród materiałów wytypowanych do analizy, tj.: PET, PP, PTFE najkorzystniejszy zespół właściwości mechanicznych do wykonania kulki posiada PET. W przypadku zastosowania PET, uzyskano najniższe wartości przemieszczeń i odkształceń, co wpływa korzystnie na precyzyjne wykonanie otworów w kości za pomocą multikątowej prowadnicy chirurgicznej wyposażonej w kulkę wykonaną z tego rodzaju materiału. Symulacja z zastosowaniem polimeru PP wykazała bardzo zbliżone wyniki przemieszczeń i odkształceń w porównaniu z materiałem PET. Na podstawie przeprowadzonych w ramach niniejszego artykułu badań stwierdzono, że kulka wykonana z materiału PTFE ulega największym odkształceniom sprężystym spowodowanym wysokimi wartościami przemieszczeń w strefie bezpośredniego kontaktu z wiertłem. Praca stanowi fragment obszernego opracowania innowacyjnego rozwiązania konstrukcyjnego narzędzia chirurgicznego umożliwiającego zamontowanie implantu płytkowego „szytego na miarę”, gdzie wymagane jest precyzyjne wprowadzenie wkrętów kostnych pod zadanymi kątami.

Praca zrealizowana w ramach projektu POWR.03.05.00-00-z098/17 „Opracowanie nowej postaci konstrukcyjnej multikątowej prowadnicy stosowanej w chirurgii kostnej” wspieranym i finansowanym przez Europejski Fundusz Społeczny.

Bibliografia

1. BHH MIKROMED, katalog: 2.01 DHS/DCS, 2018.
2. Bishop E., Handel I., Clements D., Ryan J., *Sequential drilling and drill angulation reduce the accuracy of drill hole start location in a synthetic bone model*, „Vet Rec.” 2019.
3. Brioschi V., Cook J., Arthurs G., *Can a surgeon drill accurately at a specified angle?*, „Vet Rec Open.” 2016.
4. Giles R. Scuderi, Alfred J., Jr. Tria, *Surgical Techniques in Total Knee Arthroplasty*, Springer Science & Business Media, 2006, p. 83-105.
5. MEDGAL orthopaedic implants & instruments, katalog: Płytki kostne – system 2.0.
6. Neal S. ElAttrache, Christopher D. Harner, Raffy Mirzayan, Jon K. Sekiya, *Surgical Techniques in Sports Medicine*, Lippincott Williams & Wilkins, 2007, p. 325-346.
7. Pandey R.K., Panda S.S., *Drilling of bone: A comprehensive review*, „J Clin Orthop Trauma”, 2013, p. 15-30.
8. Shales CJ., White L., Langley-Hobbs SJ., *Sacroiliac luxation in the cat: defining a safe corridor in the dorsoventral plane for screw insertion in lag fashion*, „Vet Surg.” 2009.

Dane kontaktowe

Weronika Czech, werocze018@student.polsl.pl
Karolina Machnia, karomac229@student.polsl.pl
Paulina Sośniak, paulsos946@student.polsl.pl