

Kinga SEKUŁA¹, Jerzy DETYNA², Patrycja SZYMCZYK-ZIÓŁKOWSKA³

¹KN BioAddMed, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wroclawska

²Katedra Mechaniki, Inżynierii Materiałowej i Biomedycznej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wroclawska

³Katedra Technologii Laserowych, Automatyzacji i Organizacji Produkcji, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wroclawska

WYKORZYSTANIE PROJEKTOWANIA GENERATYWNEGO W PROCESIE PROJEKTOWANIA WYTWARZANEGO PRZYROSTOWO, PERSONALIZOWANEGO IMPLANTU KOŚCI JARZMOWEJ

Streszczenie: Poniższa praca prezentuje możliwość zastosowania projektowania generatywnego w procesie projektowania implantów personalizowanych. Zaproponowano dwie geometrie personalizowanego implantu kości jarzmowej, zaprojektowanego z wykorzystaniem projektowania generatywnego. Wyniki tego badania wskazują, że integracja metod projektowania generatywnego może znacznie poprawić wydajność procesów projektowania implantów personalizowanych. Korzyści obejmują lepszą wydajność implantu, niższe koszty produkcji i krótsze cykle iteracji projektu.

Słowa kluczowe: implant personalizowany, technologie przyrostowe, projektowanie generatywne

1. WSTĘP

Wykorzystanie technologii przyrostowych w inżynierii biomedycznej i medycynie umożliwia wytwarzanie implantów i narzędzi chirurgicznych wysokiej jakości szybciej i taniej niż przy użyciu konwencjonalnych metod wytwórczych. Implant personalizowany jest projektowany przy użyciu danych z obrazowania medycznego, a następnie wytwarzany przy użyciu technologii przyrostowych. Taki implant jest znacznie lepszym rozwiązaniem niż użycie gotowego produktu ze względu na korzystniejszy wynik estetyczny. Spersonalizowane implanty optymalizują również leczenie pacjenta i zmniejszają możliwość wystąpienia powikłań [1].

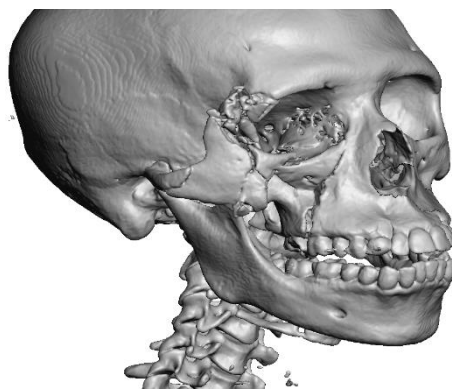
Kość jarzmowa jest jedną z kluczowych dla estetyki kości twarzoczaszki. Wytrzymuje ona siły żucia, Bierze udział w procesach żucia stanowiąc miejsce przyczepu mięśnia żwacza, przenosi siły reakcji ze strony szczęki oraz buduje oczodoł. Złamania tej kości są jednym z najczęstszych złamań w odbębnie twarzy i często powodują jej deformację lub przemieszczenie oczodołu. Ze względu na skomplikowaną budowę i szerokie zróżnicowanie

między osobnikami, uszkodzenia kości jarzmowej leczy się wykorzystując płytki chirurgiczne [2]. Ich dopasowanie do anatomii jest jednak trudne i nie zawsze skuteczne, dlatego coraz częściej wykorzystuje się implanty personalizowane [3].

W ostatnich latach projektowanie generatywne stało się przełomową technologią w różnych dziedzinach inżynierii, także w medycynie [4]. Wykorzystując algorytmy i moc obliczeniową, projektowanie generatywne umożliwia tworzenie złożonych i zoptymalizowanych struktur, które spełniają określone kryteria projektowe. Modelowanie parametryczne pozwala na zautomatyzowane, oparte na parametrach generowanie dowolnych elementów modelu. Oznacza to, że generowanie i modyfikacja elementów w ramach projektu jest kontrolowana za pomocą określonych zestawów reguł generowanych przez algorytm. Elementy są automatycznie tworzone w oparciu o zdefiniowane przez użytkownika algorytmy, a poprzez zmianę parametrów w ramach algorytmu można łatwo kontrolować projekt w sposób interaktywny. Takie podejście pozwala użytkownikowi na uzyskanie złożonych zadań projektowych poprzez półautomatyczny proces modelowania oraz dostosowanie powstałych modeli geometrycznych poprzez interaktywną modyfikację określonych parametrów [5]. Dzięki takiemu podejściu w projektowaniu implantów personalizowanych jesteśmy w stanie zaprojektować wiele iteracji dla tego samego implantu.

2. MATERIAŁ I METODA

Do zaprojektowania geometrii implantu personalizowanego kości jarzmowej zostały wykorzystane dane z obrazowania medycznego pacjenta płci męskiej, który doznał uszkodzenia kości jarzmowej oraz fragmentu kości szczęki po prawej stronie. Ze względu na wieloodłamowy charakter złamania leczenie z użyciem płytek nie byłoby funkcjonalne. Przeprowadzono segmentację danych DICOM w programie InVesalius, podczas której powstał trójwymiarowy model czaszki pacjenta widoczny na Rysunku 1.



Rys. 1. Zrekonstruowany model trójwymiarowy czaszki pacjenta

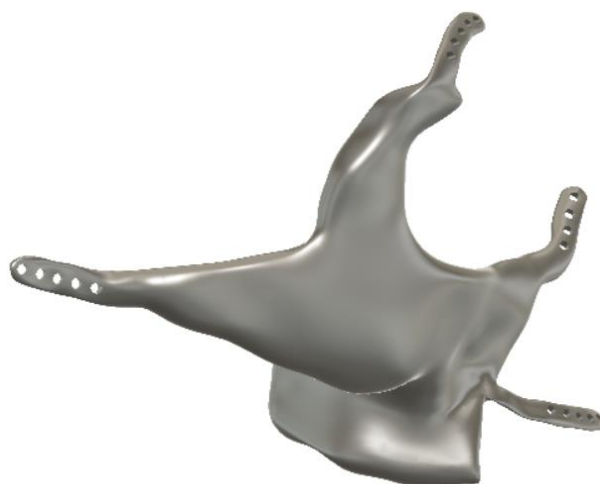
2.1. Projektowanie ogólnej geometrii implantu

Projektowanie implantu rozpoczęto od usunięcia wszystkich odłamów kostnych i artefaktów z obszaru prawej kości jarzmowej. Powstały model (Rysunek 2) został pozbawiony całej prawej kości jarzmowej wraz z łukiem jarzmowym oraz części górnej kości szczęki obejmującej ząb 17.



Rys. 2. Czaszka pacjenta po usunięciu kości jarzmowej i części szczęki

Do odzyskania odpowiedniej anatomii usuniętej części twarzoczaszki użyto odbicia lustrzanego lewej, nienaruszonej strony. Odbicie to zostało odpowiednio zmodyfikowane w taki sposób, żeby dopasować je w łuku brwiowym, wyrostku skroniowym oraz szczęcie. Użyto operacji boolowskich do wyodrębnienia kości jarzmowej i brakującej części kości szczęki. Wynikiem tego procesu była ogólna geometria implantu. Dodano do niej cztery płytki mocujące, umieszczone nad łukiem brwiowym, na kości nosowej, na kości skroniowej i na szczęcie. Korzystając z programu Fusion 360 ich powierzchnia oraz połączenie z główną częścią implantu zostały wyrównane w celu uniknięcia koncentracji naprężeń w tych miejscach. W płytkach mocujących zamodelowano także otwory na śruby mocujące. Końcową geometrię implantu jednolitego wraz z płytkami mocującymi zaprezentowano na Rysunku 3.



Rys. 3. Implant jednolity z płytkami mocującymi i otworami na śruby

2.2. Projektowanie generatywne

Na podstawie modelu implantu jednolitego został przeprowadzony proces projektowania generatywnego wykorzystujący możliwości programu Fusion 360. Model implantu został podzielony na geometrię zachowywaną (płytki mocujące oraz część szczękowa implantu) oraz geometrię początkową. Dodatkowo do zachowania zgodności anatomicznej zaprojektowano

geometrię ograniczającą, która była odsunięciem powierzchni całego implantu. Komponenty modelu wraz z miejscem przyłożenia obciążenia i wiązań przedstawiono na Rysunku 4.

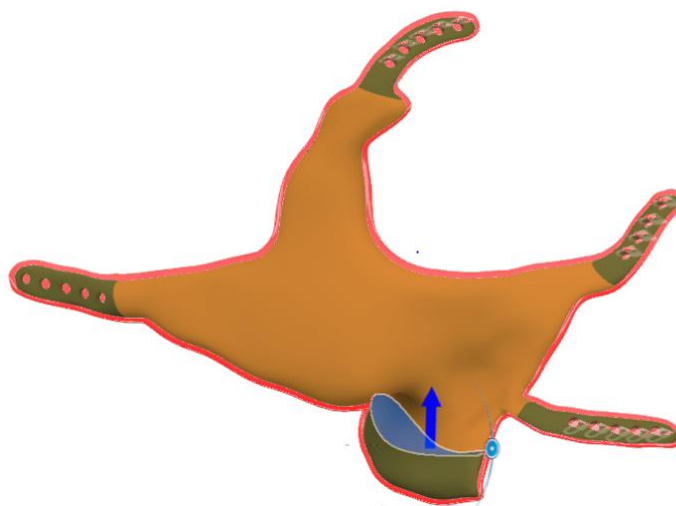
Podczas projektowania generatywnego zaprojektowano dwa badania mające na celu wygenerowanie geometrii implantu kości jarzmowej, spełniającego następujące założenia:

- zgodność anatomiczna z pacjentem,
- maksymalne naprężenia nie przekracza granicy plastyczności materiału, z którego wykonywany ma być implant,
- objętość wygenerowanego implantu ma być mniejsza niż objętość implantu jednolitego.

W kryteriach projektowych badań ustalono założenia produkcyjne i materiał. Ustalono, że implant zostanie wyprodukowany z użyciem technologii przyrostowych ze stopu tytanu Ti-6Al-4V ELI. Jego wybrane właściwości mechaniczne zostały przedstawione w Tabeli 1. Badania weryfikacyjne różniły się pomiędzy sobą zadawanymi obciążeniami. Siła przykładana do implantu w badaniu nr 1 wynosiła 250 N, a w badaniu nr 2 – 400 N. Wartości te ustalono na podstawie sił zagryzania zębów trzonowych [6].

Tabela 1. Wybrane właściwości mechaniczne materiałów [7]

<i>Material</i>	<i>Moduł sprężystości [GPa]</i>	<i>Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]</i>	<i>Granica wytrzymałości [MPa]</i>	<i>Wydłużenie [%]</i>	<i>Gęstość [g/cm³]</i>
<i>Ti-6Al-4V ELI</i>	<i>113</i>	<i>860</i>	<i>795</i>	<i>10</i>	<i>4,4</i>
<i>Kość korowa</i>	<i>18</i>	<i>140</i>		<i>1</i>	<i>0,7</i>



Rys. 4. Komponenty modelu do badania generatywnego: geometrie zachowywane (kolor zielony), kształt początkowy (kolor pomarańczowy), geometria przeszkody (kolor czerwony), obciążenie (niebieska strzałka) oraz wiązania (kółki)

Wynikiem procesu projektowania generatywnego było dwanaście geometrii implantu kości jarzmowej, po dwa na każde przeprowadzone badanie. Różniły się pomiędzy sobą objętością oraz stopniem występowania w nich dodatkowych otworów oraz struktur beleczkowych. Własności wyników badań generatywnych zawarto w Tabeli 2.

Tabela 2. Własności wyników badań generatywnych nr 1 i nr 2

<i>Nazwa</i>	<i>Objętość [mm³]</i>	<i>Masa [g]</i>	<i>Max. naprężenia von Misesa [MPa]</i>	<i>Max. przemieszczenie globalne [mm]</i>
<i>Badanie nr 1 Wynik nr 1</i>	<i>3501,3</i>	<i>15,51</i>	<i>88,25</i>	<i>0,192</i>
<i>Badanie nr 1 Wynik nr 2</i>	<i>3751,2</i>	<i>16,62</i>	<i>87,75</i>	<i>0,197</i>
<i>Badanie nr 1 Wynik nr 3</i>	<i>3725,9</i>	<i>16,51</i>	<i>88,05</i>	<i>0,185</i>
<i>Badanie nr 1 Wynik nr 4</i>	<i>3575,8</i>	<i>15,84</i>	<i>87,47</i>	<i>0,188</i>
<i>Badanie nr 1 Wynik nr 5</i>	<i>3675,9</i>	<i>16,28</i>	<i>88,06</i>	<i>0,192</i>
<i>Badanie nr 1 Wynik nr 6</i>	<i>3761,6</i>	<i>16,66</i>	<i>88,25</i>	<i>0,185</i>
<i>Badanie nr 2 Wynik nr 1</i>	<i>5855,9</i>	<i>25,94</i>	<i>83,68</i>	<i>0,145</i>
<i>Badanie nr 2 Wynik nr 2</i>	<i>6369,4</i>	<i>28,22</i>	<i>88,25</i>	<i>0,123</i>
<i>Badanie nr 2 Wynik nr 3</i>	<i>7553,7</i>	<i>33,46</i>	<i>85,08</i>	<i>0,132</i>
<i>Badanie nr 2 Wynik nr 4</i>	<i>6564,0</i>	<i>29,08</i>	<i>81,77</i>	<i>0,137</i>
<i>Badanie nr 2 Wynik nr 5</i>	<i>6737,4</i>	<i>29,85</i>	<i>88,16</i>	<i>0,137</i>
<i>Badanie nr 2 Wynik nr 6</i>	<i>7005,5</i>	<i>31,03</i>	<i>84,08</i>	<i>0,136</i>

3. WYNIKI ANALIZY MES

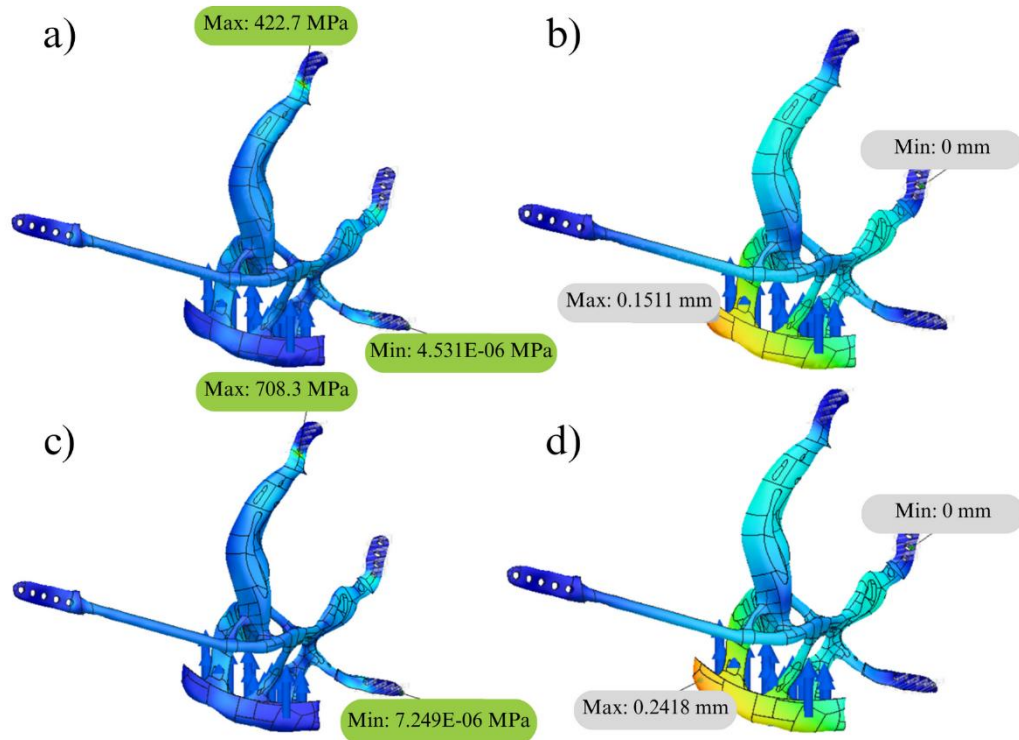
Do analizy elementów skończonych wybrano po jednym, najlepszym wyniku z badań generatywnych. Podczas wyboru brano pod uwagę objętość geometrii, naprężenia von Misesa, przemieszczenia globalne, a także strukturę implantu. Z badania nr 1 wybrano wynik nr 6, natomiast z badania nr 2 wybrano wynik nr 1. Przeprowadzono dla nich analizę MES dla obciążeń 250 N i 400N, które symulowały średnią i maksymalną siłę gryzienia działające na dolną część implantu. Utwierdzenie implantu umieszczono na otworach w płytkach mocujących. Wielkość elementów siatki oparto na rozmiarze geometrii i wynosiła ona maksymalnie 10% długości przekątnej ramki ograniczającej model. Dodatkowo siatka została poddana adaptacyjnemu zagęszczeniu w miejscach przyłożenia siły i w miejscach utwierdzenia.



Rys. 5. Geometria implantu kości jarzmowej uzyskana z wykorzystaniem projektowania generatywnego dla obciążenia 250 N

Geometrię personalizowanego implantu kości jarzmowej uzyskanego z wykorzystaniem projektowania generatywnego dla obciążenia 250 N przedstawiono na Rysunku 5.

Na Rysunku 6 przedstawiono wyniki symulacji MES implantu wygenerowanego dla obciążenia 250 N (badanie nr 1 wynik nr 6).



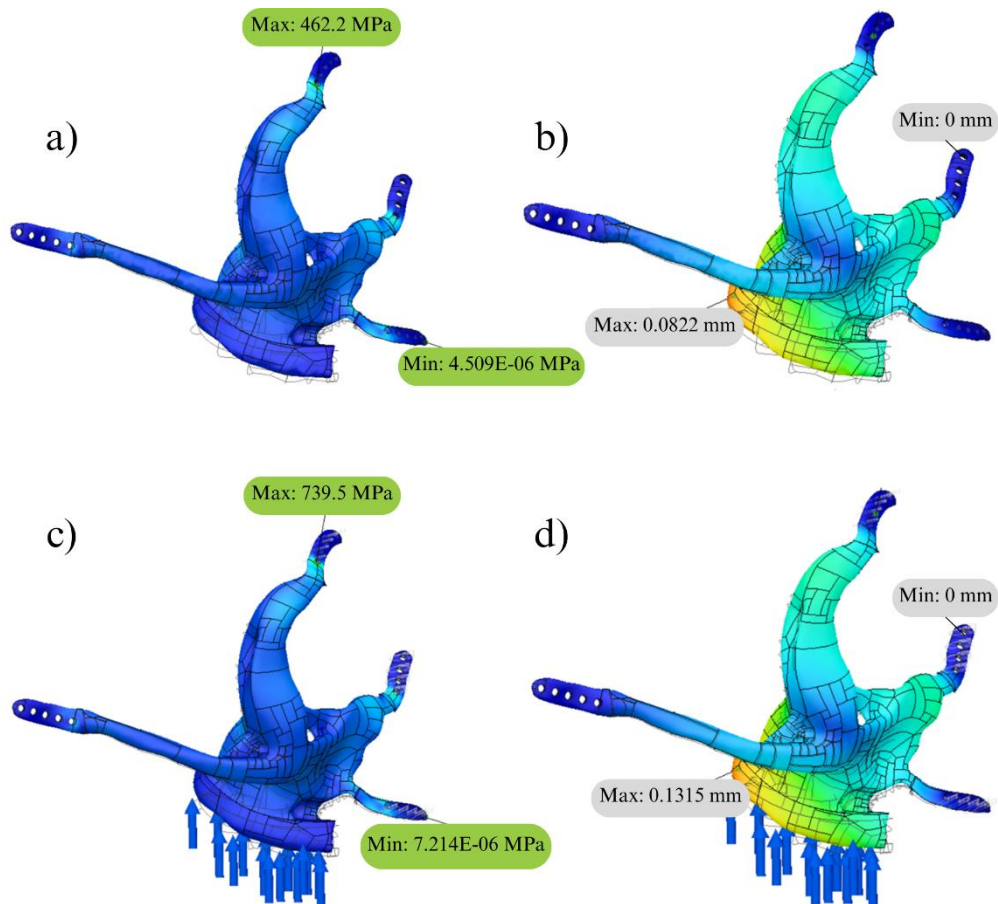
Rys. 6. Wyniki analizy elementów skończonych dla wygenerowanego implantu kości jarzmowej (badanie nr 1 wynik nr 6); a) naprężenia zredukowane dla obciążenia 250N, b) przemieszczenia dla obciążenia 250N, c) naprężenia zredukowane dla obciążenia 400N, d) przemieszczenia dla obciążenia 400N

Geometrię implantu uzyskanego z wykorzystaniem projektowania generatywnego dla obciążenia 400 N przedstawiono na Rysunku 7.



Rys. 7. Geometria implantu kości jarzmowej uzyskana z wykorzystaniem projektowania generatywnego dla obciążenia 400 N

Na Rysunku 8 przedstawiono wyniki symulacji MES implantu wygenerowanego dla obciążenia 400 N (badanie nr 2 wynik nr 1).



Rys. 8. Wyniki analizy elementów skończonych dla wygenerowanego implantu kości jarzmowej (badanie nr 2 wynik nr 1); od górnego lewego obrazu: naprężenia zredukowane dla obciążenia 250N, przemieszczenia dla obciążenia 250N, naprężenia zredukowane dla obciążenia 400N, przemieszczenia dla obciążenia 400N

Dla zaprojektowanych i wygenerowanych geometrii implantów obliczono objętość, którą przedstawiono w Tabeli 3. Objętość implantu kości jarzmowej wynosiła 9449 mm^3 , natomiast objętość geometrii implantów wygenerowanych podczas projektowania generatywnego wynosiła kolejno 3613 mm^3 i 5815 mm^3 dla badania generatywnego dla 250 N i 400 N.

Tabela 3. Objętość geometrii zaprojektowanych implantów

	Objętość (mm^3)	
<i>Implant jednolity</i>	9449	
<i>Generowany dla obciążenia:</i>	<i>250 N</i>	<i>400 N</i>
<i>Implant uzyskany przy pomocy projektowania generatywnego</i>	3613	5815

4. PODSUMOWANIE

Opracowane podczas badań konstrukcje personalizowanego implantu kości jarzmowej spełniły założone wymagania. Wykorzystanie projektowanie generatywnego pozwoliło na stworzenie geometrii o odpowiednich właściwościach mechanicznych, budowie zgodnej z anatomią pacjenta oraz o mniejszej objętości niż implant jednolity.

Spośród implantów poddanych analizie MES największe naprężenie zredukowane obecne było punktowo w implancie z badania generatywnego nr 2 wynik nr 1, poddanego obciążeniu 400 N. Wynosiło ono 739,5 MPa i zlokalizowane było na krawędzi pierwszego otworu mocującego do kości czołowej. Dowodzi to, że zaprojektowane implanty kości jarzmowej posiadają wymaganą wytrzymałość mechaniczną, ponieważ maksymalne naprężenia w nich obecne są mniejsze niż granica plastyczności materiału Ti6Al4V ELI.

Dalsze prace nad wykorzystaniem projektowania generatywnego w projektowaniu implantów personalizowanych będą obejmowały kolejne rodzaje implantów oraz wysokocyklowe, wieloosiowe badania zmęczeniowe implantów wyprodukowanych z użyciem technologii przyrostowych.

LITERATURA

- [1] Chepurnyi Y., Kustro T., Chernogorskyi D., Zhukovtseva O., Kanura O., Kopchak A.: Application of Patient-Specific Implants as Alternative Approach to Zygoma Defect Management - A Retrospective Study, *Ann Maxillofac Surg*, vol. Jan-Jun 11(1), 2021, p. 91-96.
- [2] Bradley D., Leung B., Saxena S., Dungarwalla M., Chapiro D., Fan K.: Surgical management of zygomatic complex fractures in a major trauma centre, *Plast Aesthet Res*, 2019, p. 6-11.
- [3] Meena V. K., Gagandeep, Aneesh, Rattan V., Luthra G., Kalra P.: Development of a custom zygomatic implant using metal sintering, *Rapid Prototyping Journal*, vol. 24 no. 5, 2018, p. 828-831.
- [4] Kanagalingam S., Dalton C., Champneys P. et al.: Detailed design for additive manufacturing and post processing of generatively designed high tibial osteotomy fixation plates, *Prog Addit Manuf* vol. 8, 2023, p. 409–426.
- [5] Ricotta V., Campbell R. I., Ingrassia T. et al.: A new design approach for customised medical devices realized by additive manufacturing, *Int J Interact Des Manuf*, vol. 14, 2020, p. 1171–1178.
- [6] Takaki P., Vieira M., Bommarito S.: Maximum Bite Force Analysis in Different Age Groups. *International Archives of Otorhinolaryngology*, vol. 18(3), 2014, p. 272-276.
- [7] McCracken M.: Dental implant materials: commercially pure titanium and titanium alloys. *J Prosthodont*, vol. 8(1), 1999, p. 40-3.

THE USE OF GENERATIVE DESIGN IN THE DESIGN PROCESS OF AN ADDITIVE MANUFACTURED PATIENT SPECIFIC ZYGOMATIC BONE IMPLANT

Abstract: The following work explores the application of generative design to the traditional patient-specific implant design process. Two geometries of a patient-specific zygomatic implant designed using generative design were proposed. The results of this study show that the integration of generative design methods can significantly improve the efficiency of patient-specific implant design processes. Benefits include improved implant performance, reduced manufacturing costs and shorter design iteration cycles.