

APARATURA BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

Zastosowanie systemów RE/CAD/RP w procesie projektowania i wytwarzania modeli medycznych żuchwy

GRZEGORZ BUDZIK¹, JAN BUREK², TOMASZ DZIUBEK¹, PAWEŁ TUREK²

¹KATEDRA KONSTRUKCJI MASZYN, ²KATEDRA TECHNIK WYTWARZANIA I AUTOMATYZACJI,
POLITECHNIKA RZESZOWSKA IM. I. ŁUKASIEWICZA

Słowa kluczowe: rapid prototyping, reverse engineering, dokładność, systemy optyczne, żuchwa

STRESZCZENIE:

Praca przedstawia badania nad stworzeniem zautomatyzowanej procedury umożliwiającej projektowanie i wytwarzanie modeli medycznych żuchwy. Pierwszy etap badań przyjętej procedury, polegał na zebraniu danych pomiarowych oraz odtworzeniu geometrii modelu żuchwy z danych Digital Imaging and Communications in Medicine (DICOM). Następnie zastosowano system CAD – Catia, który umożliwił rekonstrukcję ciągłości geometrii żuchwy oraz przygotowanie jej modelu w celu późniejszego wytworzenia przy użyciu technik przyrostowych lub ubytkowych. Przeprowadzono także ocenę stopnia skorygowania położenia uszkodzonego odcinka względem zarysu nominalnego żuchwy. W celu wykonania gotowego modelu medycznego żuchwy zastosowano technologię przyrostową FDM, oraz przeprowadzono analizę dokładności wykonania gotowego modelu.

Application of RE/CAD/RP systems in the design and manufacture medical models of mandible

Keywords: rapid prototyping, reverse engineering, accuracy, optical systems, mandible

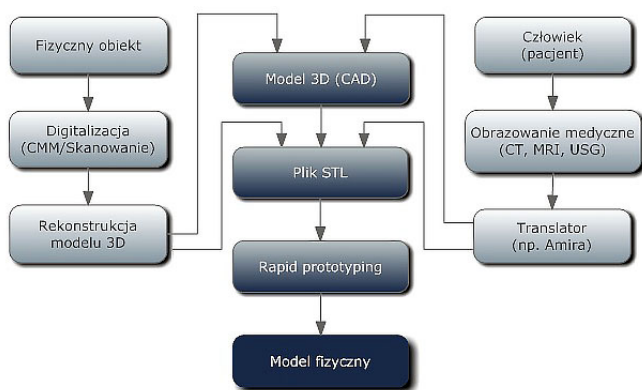
ABSTRACT:

This paper presents results of the research focused on creation of an automated procedure that allows the design and manufacture medical models of the mandible. In the first stage of this study DICOM data was collected and reconstructed geometry of the mandible. In second stage of this process used software CAD – Catia. This software reconstructed continuity geometry of the mandible and prepared this model for manufactured with used rapid prototyping technology. Also in this paper, presents results demonstrated degree of damage right side of mandible before the injury. Medical model of the mandible, manufactured with using FDM technology. In final stage of this procedure, created rapport present analysis on accuracy of manufactured.

1. WSTĘP

W ostatnim czasie obserwuje się wykorzystanie w coraz większym zakresie systemów Reverse Engineering (RE), Computer-Aided Design (CAD) oraz Rapid Prototyping (RP) w procesie projektowania i wytwarzania modeli medycznych [1-3]. Proces odtwarzania geometrii struktur anatomicznych obejmuje zastosowanie metod pomiarowych dotykowych lub bezdotykowych, następnie obróbkę pozyskanych danych pomiarowych i na ich podstawie wykonanie metodami przyrostowymi bądź ubytkowymi modelu fizycznego [4]. W celu zwiększenia komfortu leczenia lekarze coraz częściej sięgają po wymienione metody, współpracując tym samym z ośrodkami naukowymi.

W projektowaniu modeli medycznych wyróżnia się dwie odrębne metody przygotowania trójwymiarowych modeli (Rys. 1). Pierwszy sposób polega na wykonaniu modeli przy wykorzystaniu danych ze skanera optycznego lub współrzędnościowej maszyny pomiarowej. Uzyskana powierzchnia modelu rozpięta jest na chmurze punktów. Druga metoda polega na przygotowaniu modeli na bazie obrazów otrzymanych podczas procesu pomiarowego przeprowadzonego w procesie pomiarowym przy użyciu tomografii komputerowej lub rezonansu magnetycznego. W obu przypadkach można zapisać gotowy model w formacie Standard Template Library (STL), Initial Graphics Exchange Specification (IGES), co stanowi punkt wyjścia do wykonania go dostępnymi technikami wytwarzania.



Rysunek 1 Metody wykonania modeli medycznych przy użyciu systemów RE/CAD/RP [5]

Zastosowanie modeli medycznych w procesach rekonstrukcji twarzoczaszki staje się coraz bardziej popularne, a w niektórych przypadkach wręcz niezbędne. Szczególnie tyczy się to obszaru żuchwy.

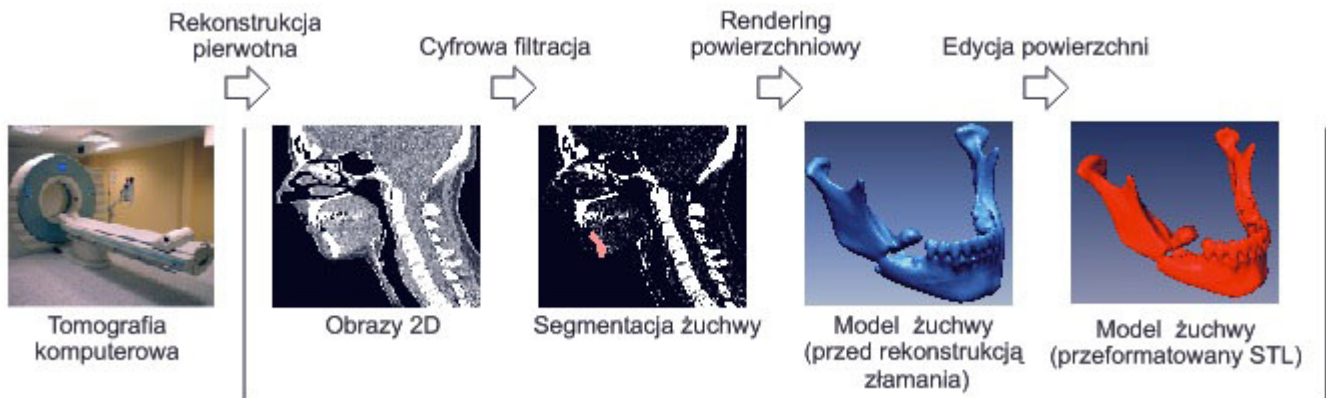
Często w wyniku wykrycia nowotworu w obrębie żuchwy pacjenta przeprowadza się proces resekcji. Polega on na usunięciu obszaru zaatakowanego przez chorobę. Do odtworzenia ciągłości żuchwy po przeprowadzeniu takiego zabiegu lub w wyniku złamania kości tradycyjnie stosuje się przeszczepy autogenne lub w przypadku dużych uszkodzeń i ubytków płytki chirurgiczne [6]. W celu usprawnienia przeprowadzenia procesu chirurgicznego oraz zwiększenia dokładności i precyzji jego wykonania naukowcy ciągle pracują nad wprowadzeniem zautomatyzowanego systemu projektowania oraz wytwarzania modeli medycznych.

2. METODYKA REALIZACJI PROCESU WYKONANIA MODELU ŻUCHWY

Pacjentka w wyniku odniesionego wypadku, uszkodziła prawą część żuchwy. Pomiar na tomografie komputerowym potwierdził, że żuchwa pacjentki jest złamana z przesunięciem w odcinku bocznym. Udostępnione dane ze szpitala pozwoliły na stworzenie procedury, która polegała na cyfrowej rekonstrukcji ciągłości geometrii żuchwy oraz zastosowaniu przyrostowej techniki wytwarzania w celu wykonania gotowego modelu medycznego.

2.1 Projektowanie RE modelu żuchwy

Pierwszy etap adaptacji przyjętej procedury polegał na pozyskaniu danych pomiarowych oraz odtworzeniu geometrii modelu żuchwy z danych DICOM (Rys. 2). Proces badawczy został przeprowadzony na żuchwie pacjentki, którą poddano skanowaniu na tomografie Siemens Somatom Sensation Open 40. Podczas procesu pomiarowego został zastosowany tradycyjny protokół skanowania przewidziany dla obszaru twarzoczaszki (HeadRoutineSeq). Uzyskane dane wolumetryczne charakteryzowały się anizotropową strukturą voxela: 0,4 mm x 0,4 mm x 1,5 mm. W celu zwiększenia dokładności modelu wczytane obrazy zostały poddane procesowi cyfrowej filtracji. W wyniku przeprowadzonych działań zwiększono rozdzielczość kontrastową w strefach rozmycia. Parametry wyostżenia oraz odszumiania zostały dobrane empirycznie w celu uzyskania jak najlepszego efektu.

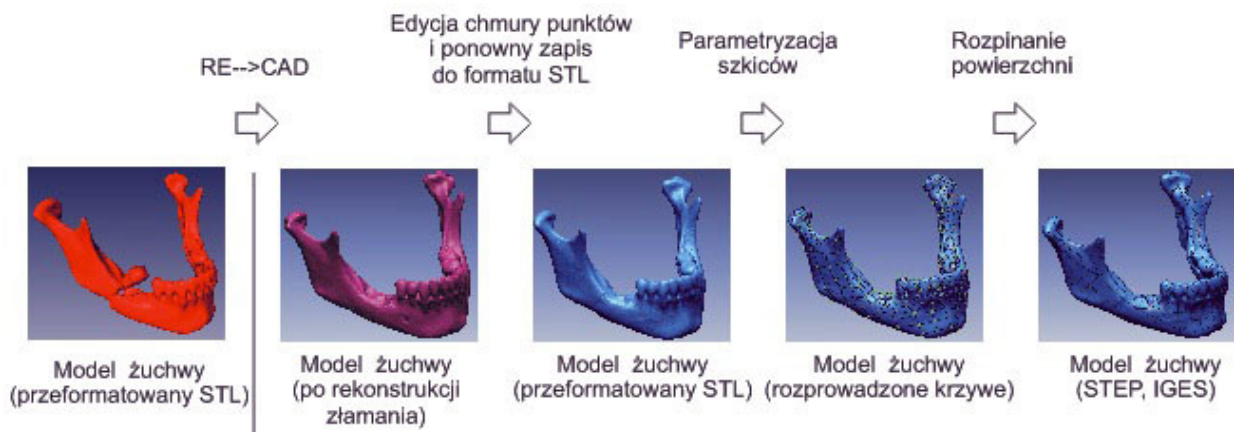


Rysunek 2 Etap akwizycji danych oraz projektowania RE [7]

Na podstawie przygotowanych danych dobrano wartość 200 HU jako wartość dolnego progu segmentacji. Względem niego przeprowadzono proces wyodrębnienia żuchwy. W procesie segmentacji użyto metodę region growing. Należy ona do grupy metod obszarowych, które polegają na wyborze pikseli o podobnym odcieniu i zakwalifikowaniu ich do jednej grupy określającej daną tkankę (obszaru jednorodności). Powstały w wyniku segmentacji zbiór zarysów 2D stanowił trójwymiarową reprezentację badanej żuchwy. W celu zobrazowania modelu przestrzennego żuchwy zastosowano metodę isosurface, która wchodzi w skład metod renderingu powierzchniowego. Bazuje ona na algorytmie maszerujących sześcianów (Marching Cubes) [8, 9]. Ze względu na występowanie nieproporcjonalnych trójkątów w powstałej siatce STL, przeprowadzono proces edycji powierzchni. Polegał on na utworzeniu siatki trójkątów składającej się z bardziej regularnych trójkątów. Tak przygotowany model został zapisany i wczytany do oprogramowania CAD – Catia V5R18.

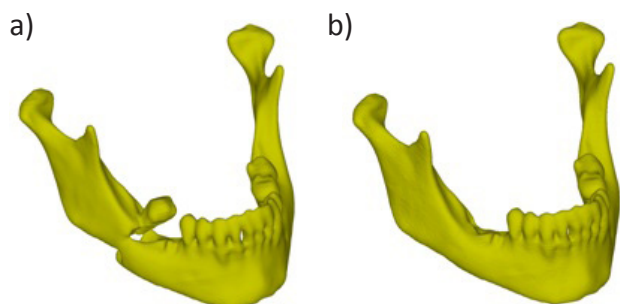
2.2 Projektowanie CAD oraz wykonanie modelu żuchwy techniką przyrostową

Kolejny etap algorytmu procedury polegał na zastosowaniu systemu CAD w projektowaniu gotowego modelu żuchwy (Rys. 3). Proces nastawienia złamania oraz zrekonstruowania powierzchni przeprowadzony został w trzech krokach. W pierwszym kroku usunięto siatkę STL obrazującą ząb, a także uszkodzoną powierzchnię w miejscu złamania. Drugi krok to dopasowanie części złamanej do całego modelu żuchwy. W tym celu zastosowano algorytm Best Fit. Proces ten odbywał się interaktywnie przez minimalizację kwadratów odległości między obiektem stałym (żuchwa) a dopasowywanym (część złamana). Określono warunek dopasowania do 0,001 mm. Proces trwał tak długo, aż została osiągnięta zgodność tego warunku, a tym samym najlepsze dopasowanie dwóch przerwanych odcinków żuchwy. Po wykonaniu tej części przeprowadzono proces mostkowania. Polegał on na rekonstrukcji powierzchni złamania pomiędzy dwoma przerwany krawędziami. W wyniku całego procesu odtworzono wygląd żuchwy sprzed wystąpienia urazu (Rys. 4).



Rysunek 3 Etap projektowania CAD [7]

Następnie przeprowadzono proces ujednolicenia otrzymanej chmury punktów. Na przefiltrowanych punktach wygenerowano ponownie siatkę STL, a także przeprowadzono proces jej edycji. Uzyskany ostatecznie przeformatowany model STL nie zawierał uszkodzonych, zduplikowanych trójkątów. Tak przygotowany model posłużył do wykonania modelu fizycznego żuchwy na drukarce 3D.



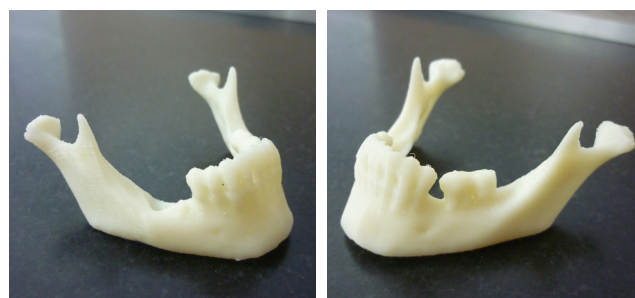
Rysunek 4 a) Widok żuchwy uszkodzonej, b) widok żuchwy zrekonstruowanej

Na etapie modelowania CAD wykorzystywane są profile, jednak zasadniczą rolę przy tworzeniu modelu CAD (Rys. 3) odgrywają punkty kontrolne, służące do definiowania krzywych – zarówno płaskich, jak i przestrzennych. Na krzywych tych z kolei rozpinane są powierzchnie. Powierzchnie takie mogą zostać podzielone na te, które możemy zapisać w postaci wzorów matematycznych, oraz powierzchnie swobodne składające się z nieskończonej liczby punktów. Współrzędne te nie są powiązane żadnymi zależnościami matematycznymi, co ostatecznie pozwala na dużą elastyczność. Modelowanie powierzchniowe stosowane jest głównie tam, gdzie występują bardzo złożone kształty modeli np. w przypadku zaprojektowania skomplikowanego ubytku struktury kostnej. Pierwszym etapem tworzenia modelu powierzchniowego było zdefiniowanie krzywych przechodzących przez punkty tworzące siatkę po-

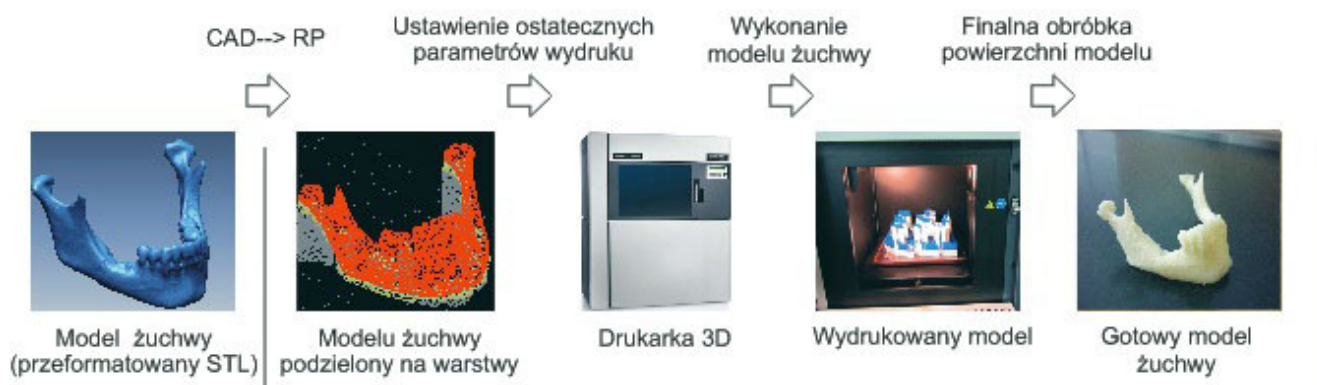
ligonalną (łamaną). Dzięki możliwości przemieszczania punktów węzłowych jest możliwe indywidualne modelowanie przebiegu każdej krzywej. Końcowy etap tworzenia modelu powierzchniowego polegał na pokryciu siatki poligonalnej elementarnymi płacami powierzchni typu NURBS. Każdy płat jest opisany za pomocą określonej liczby punktów kontrolnych, które decydują o jakości dopasowania płata do odpowiedniego fragmentu siatki poligonalnej. Otrzymany w ostatniej fazie procesu model powierzchniowy może być eksportowany za pomocą różnych formatów wymiany danych CAD takich jak IGES i może posłużyć w procesie wykonania gotowego modelu fizycznego metodą obróbki skrawaniem [7].

Model żuchwy został wykonany na drukarce Fortus 360 mc która znajduje się w Katedrze Technik Wytwarzania i Automatyzacji. Drukarka ta bazuje na technologii FDM. Polega ona na warstwowym osadzaniu termoplastycznego tworzywa sztucznego, w wyniku czego powstaje gotowy model (Rys. 5) [4, 10, 11].

W procesie „wydruku” modelu żuchwy zastosowano głowice drukujące o oznaczeniu T16, które gwarantują uzyskanie pojedynczej grubości warstwy na poziomie 0,254 mm. Do wydruku użyto materiał ABS. Materiał podporowy po wykonanym wydruku został usunięty przy użyciu wodnego roztworu wodorotlenku sodu, zaś model osuszono (Rys. 6).



Rysunek 6 Gotowy model żuchwy



Rysunek 5 Etap wytwarzania modelu technikami przyrostowymi [7]

3. WYNIKI

W procesie rekonstrukcji złamanej żuchwy przeprowadzono analizę oceniającą, w jakim stopniu skorygowano położenie uszkodzonego odcinka (Rys. 7).



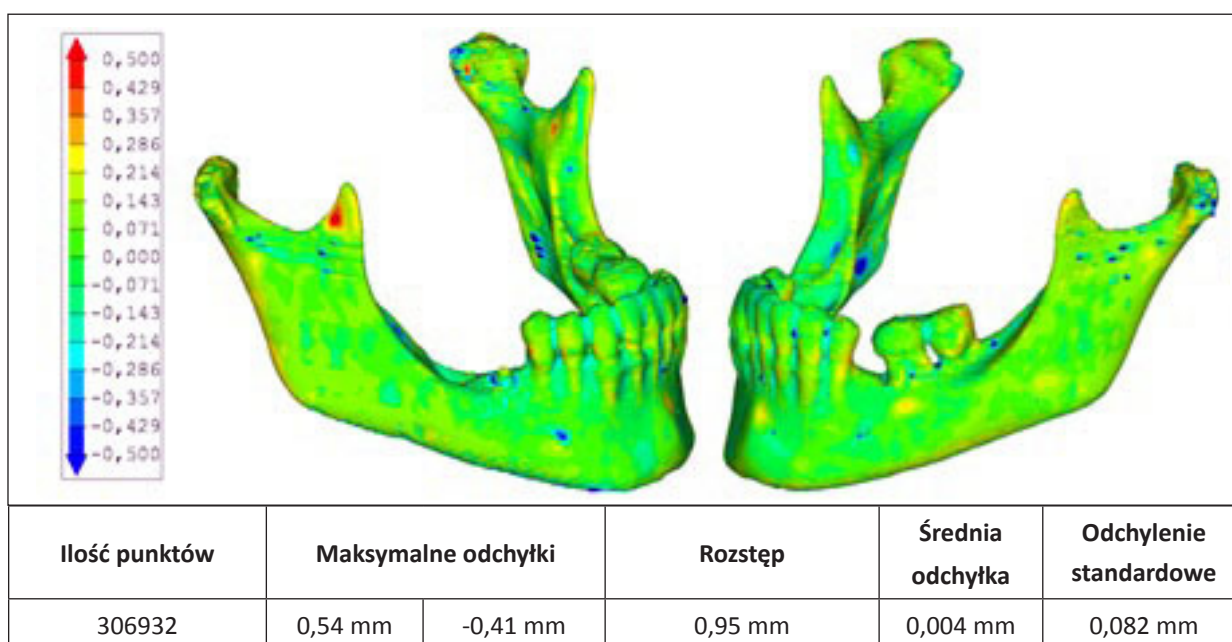
Rysunek 7 Korygowanie położenia uszkodzonego odcinka bocznej żuchwy

Podczas procesu korygowania położenia zastosowano metodę Best Fit i określono warunek dopasowania do 0,001 mm. W efekcie końcowym uzyskano parametry definiujące stopień przemieszczenia odcinka bocznej żuchwy. Translacje względem osi wyniosły odpowiednio: $X=-0,578$ mm, $Y= 4,774$ mm, $Z=-4,721$ mm, a obroty modelu względem zadanych osi $X= 10^\circ$, $Y= 9^\circ$, $Z=1^\circ$.

Raport końcowy dokładności wykonania modelu uzyskano na podstawie porównania modelu nominalnego uzyskanego na etapie projektowania RE/CAD z modelem odniesienia powstałym w wyniku przeprowadzenia procesu pomiarowego przy użyciu systemu optycznego Atos II Triple Scan (Rys. 8). Proces dopasowania, tak jak w przypadku korygowania położenia odcinka bocznej żuchwy, przeprowadzono przy użyciu metody Best Fit. Warunek dopasowania określono do 0,001 mm.

4. DYSKUSJA I WNIOSKI KOŃCOWE

Przedstawiona procedura przetwarzania danych w systemach RE/CAD/ RP, która polegała na cyfrowej rekonstrukcji ciągłości geometrii żuchwy, może okazać się sprawnym narzędziem używanym w procesie wspierania lekarzy podczas przeprowadzania zabiegów chirurgicznych. Etap RE pozwala na odtworzenie modelu trójwymiarowego żuchwy z danych DICOM, a etap projektowania CAD umożliwia kompletne odtworzenie geometrii modelu sprzed wystąpienia urazu. Zastosowanie systemów RE/CAD przygotowuje dane wyjściowe do wykonania gotowych modeli technikami przyrostowymi jak i ubytkowymi. Zastosowana metoda FDM pozwala wykonać model żuchwy w zakresie tolerancji $\pm 0,17$ mm. W przedstawionym raporcie należy również uwzględnić błędy systemu pomiarowego Atos Triple Scan, które mieszczą się w zakresie $\pm 0,01$ mm. Z aktualnych badań wynika, że akceptowalna dokładność wykonania modeli medycznych wynosi $\pm 0,5$ mm w obrębie twarzoczaszki pacjenta [3, 9]. Przedstawiony zakres tolerancji dotyczy zastosowania wytwarzanych modeli medycznych w procesie doginania płytek chirurgicznych. Przedstawione wyniki pozwalają stwierdzić, że metoda FDM umożliwia wykonanie z należytą dokładnością modelu medycznego, który może posłużyć w procesie rekonstrukcji operacyjnej żuchwy.



Rysunek 8 Raport dokładności modelu żuchwy wykonanego w technologii FDM

LITERATURA

- [1] Mehra P., Miner J., D’Innocenzo R., Nadershah M., Use of 3-D stereolithographic models in oral and maxillofacial surgery, *Journal of Maxillofacial and Oral Surgery*, 10(1), 6-13, 2011.
- [2] Liu Y. F., Xu L. W., Zhu H. Y., Liu S. S. Y., Technical procedures for template-guided surgery for mandibular reconstruction based on digital design and manufacturing, *BioMedical Engineering OnLine*, 13(1), 63, 2014.
- [3] Budzik G., Burek J., Dziubek T., Markowska O., Turek P., Pakla P., Zastosowanie technologii Rapid Prototyping w procesie rekonstrukcji obszarów twarzoczaszki, *Mechanika w Medycynie*, 12, 16-29, 2014.
- [4] Raja V., Kiran J. F., *Reverse Engineering – An Industrial Perspective*, Springer Series in Advanced Manufacturing, 2010.
- [5] Budzik G., Burek J., Dziubek T., Markowska O., Turek P., Rekonstrukcja geometrii żuchwy i korony zęba przy użyciu optycznych systemów pomiarowych, *Problemy Nauk Stosowanych*, Tom 2, 121-130, 2014.
- [6] Dąbrowski J., Przybysz J., Piętka T., Domański W., Chloupek A., Krzymański G., Tytanowe płyty rekonstrukcyjne w odtwarzaniu ciągłości żuchwy, *Czas. Stomat.*, 63, 11, 663-671, 2010.
- [7] Budzik G., Burek J., Turek P., Płodzień M., Dziubek T., Gdula M., Analiza dokładności modelu kości jarzmowej wykonanego na 5-osiowym centrum obróbkowym, *Mechanik*, 2/CD, 2015.
- [8] Lorensen W., Cline H., Marching cubes: a high resolution 3D surface construction, *Algorithm Computer Graphics*, 21(4), 163-169, 1987.
- [9] Newman T. S., Yi H., A survey of the marching cubes algorithm, *Computers and Graphics*, 30(5), 854-879, 2006.
- [10] Gibson I., Rosen D. W., Stucker B., *Additive Manufacturing Technologies – Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*, 2010.
- [11] Gebhardt A., *Rapid Prototyping*, Munich, Hanser, 2003.