

mgr inż. Markowska Olimpia, email: [olimpia@prz.edu.pl](mailto:olimpia@prz.edu.pl)  
dr hab. inż. Budzik Grzegorz, prof. PRz, email: [budzik@prz.edu.pl](mailto:budzik@prz.edu.pl)  
Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa

## **Innowacyjne metody wytwarzania implantów kostnych za pomocą inżynierii odwrotnej (RE) oraz technik szybkiego prototypowania (RP).**

Streszczenie: W artykule przedstawiono możliwości wykorzystania przyrostowych technik szybkiego prototypowania (RP) oraz inżynierii odwrotnej (RE) w implantologii kości sklepienia czaszki. W badaniach posłużono się danymi tomograficznymi (CT) pacjentów z urazami czaszki. W trakcie digitalizacji danych DICOM użyto programu 3D Doctor, a następnie stworzono modele CAD uzupełnień ubytków w programie CATIA V5. Na podstawie modeli CAD wykonano prototypy implantów wybranymi metodami RP.

## **Innovative methods of manufacturing bone implants using the reverse engineering (RE) and the rapid prototyping (RP) techniques.**

Abstract: The paper presents the possibilities of using the rapid prototyping techniques and the reverse engineering in the process of filling skull defects. The CT data of patients with skull injuries were digitalized by 3D-Doctor program. On that basis the CAD models were prepared in CATIA V5 program. Then CAD models were used to create RP prototypes.

### **1. WPROWADZENIE**

Rekonstrukcja ubytków kości występuje zwykle w skutek patologicznych lub chorobowych zmian wymagających interwencji chirurga. Może także być wynikiem urazów. Procesy rekonstrukcji ubytków dotychczas stosowanymi metodami są pracochłonne oraz czasochłonne. Obecnie w kranioplastyce stosuje się wszczepy m.in. z: bioceramicznej płytki hydroksyapatytowej, akrylu, polimetakrylanu metylu (PMMA), płyt oraz odlewów tytanowych, autogenego płata kostnego, płytki polipropylenowo-poliestrowej, prasowanej stali chromowo-kobaltowo-molibdenowej a także z odbiałczanej kości bydłcej.

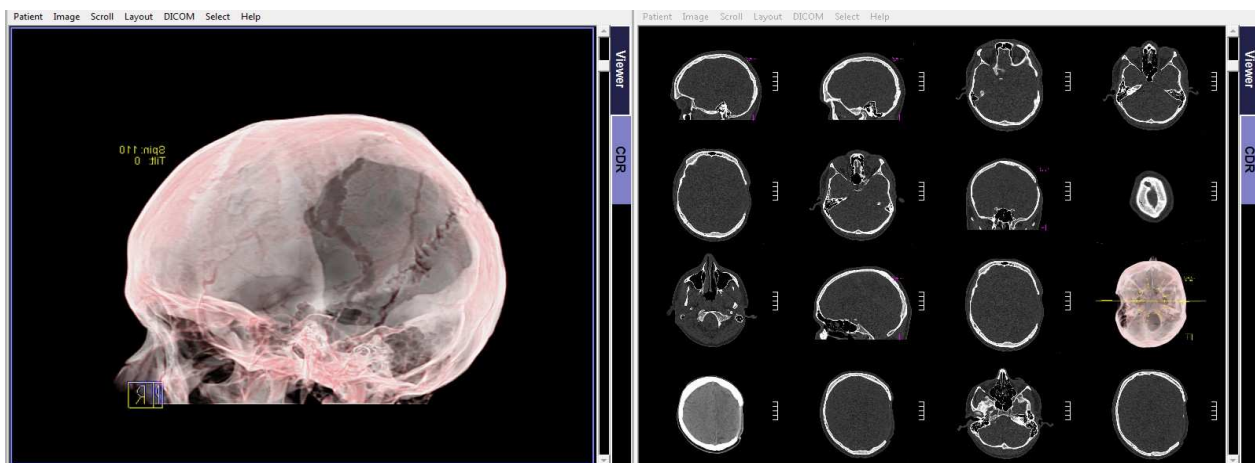
Widoczny postęp w zakresie metod szybkiego prototypowania (RP) oraz inżynierii odwrotnej (RE) daje możliwość wykorzystania wytworzonych modeli badawczych, wzorcowych oraz gotowych modeli fizycznych w wielu aplikacjach medycznych. Zastosowanie tych metod znacznie przyspieszy proces otrzymywania nowych rozwiązań, a także modernizacji już istniejących.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie możliwości wykorzystania tomografii komputerowej, modelowania numerycznego oraz technik szybkiego prototypowania dla potrzeb projektowania uzupełnień ubytków kostnych czaszki. Wykorzystanie wymienionych metod pozwoli usprawnić proces diagnostyki złożonych patologii, znacznie zmniejszyć ryzyko wystąpienia komplikacji w trakcie zabiegu operacyjnego, oraz powikłań pooperacyjnych, poprawić komunikację między członkami zespołu medycznego w trakcie diagnozowania pacjenta, skrócić czas operacji, oraz zmniejszyć jej koszty.

## 2. PRZYGOTOWANIE NUMERYCZNEGO MODELU STL

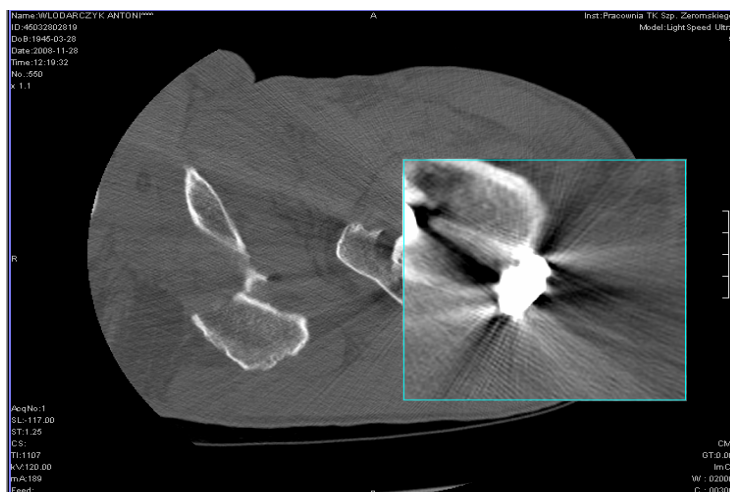
W przypadku precyzyjnej rekonstrukcji ubytków kostnych niezbędne jest wykorzystanie procesu inżynierii odwrotnej (RE - Reverse Engineering). Metoda ta polega na przekształceniu obiektu fizycznego w model wirtualny przy wykorzystaniu przestrzennej techniki pomiarowej. Metody RE są szczególnie przydatne w odtwarzaniu geometrii elementów o skomplikowanych kształtach.

Stworzenie modelu wektorowego 3D ubytku jest możliwe na podstawie danych uzyskanych z tomografii komputerowej (CT). Pomiary pacjentów z ubytkami kości czaszki zostały przeprowadzone w Katedrze Radiologii Collegium Medicum Uniwersytetu Jagiellońskiego przy użyciu wielorzędowego spiralnego tomografu komputerowego Siemens Sensation 10.



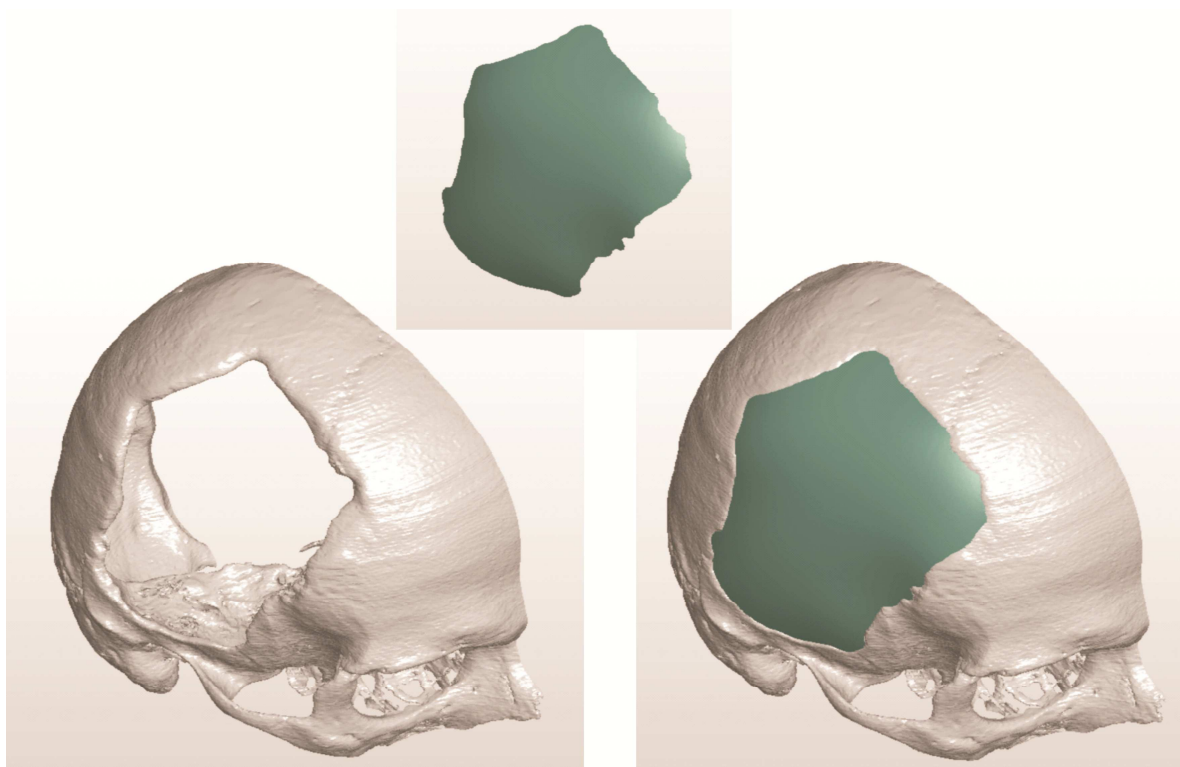
Rys.1. Zbiór obrazów rastrowych w formacie DICOM .

Uzyskane obrazy 2D (DICOM) zostały poddane segmentacji, czyli wyodrębnieniu tylko tych elementów, które były podstawą dla opracowania modelu medycznego (rys. 1). Każdy obraz zawiera informację z pojedynczej warstwy skanowanego obiektu, która składa się z macierzy pojedynczych wokseli. Element macierzy stanowi matematyczną interpretację gęstości HU – Housfieldda w odniesieniu do skali odcieni szarości obrazu. Jego wartość jest proporcjonalna do współczynnika osłabienia promieniowania rentgenowskiego po przejściu przez badany obiekt. Wygenerowany w trakcie rekonstrukcji warstw zbiór obrazów może być źródłem danych do wizualizacji 3D objętościowej VR (*ang. Volume Rendering - VR*) lub powierzchniowej. Największy problem wpływający na dokładność pomiarów w badaniach CT stanowią artefakty, tj. zakłócenia obrazu wynikające z dużej gęstości materiału badanego obiektu (rys. 2). Model numeryczny został przygotowany i przetworzony przy użyciu programu 3D-DOCTOR firmy Able Software Corp.



Rys. 2. Widoczne artefakty podczas analizy obrazów rastrowych.

Konwersja danych do modelu powierzchniowego umożliwia pełną manipulację modelem w systemach CAD np. dodanie do modelu dodatkowych cech geometrycznych czy opracowanie na tej podstawie modelu uzupełnienia ubytku kości (rys. 3). Tworzenie wypełnienia ubytku polegało na wygenerowaniu lustrzanego odbicia nieuszkodzonej półkuli badanego pacjenta [1].



Rys.3. Generowanie uzupełnienia ubytku kości sklepienia czaszki.

### 3. PRZYROSTOWE TECHNOLOGIE RP

Wykonanie implantów korzystając z technologii szybkiego prototypowania odbywa się na podstawie danych uzyskanych metodami inżynierii odwrotnej. Przedstawione wybrane technologie RP są technikami przyrostowymi i wykorzystują procesy kształtowania modelu poprzez stopniowe dodawanie materiału. W procesach przyrostowego prototypowania element tworzony jest bez użycia form, matryc czy narzędzi skrawających. Model wykonywany jest w trakcie jednej operacji zatem planowanie operacji procesu jest ograniczone do minimum stosownie do zastosowanego urządzenia RP. Do najczęściej stosowanych zaliczane są: JS - Jetting System – PolyJet, SLS - Selective Laser Sintering – EOS, SLA – Stereolithography, 3DP - Three Dimensional Printing, FDM - Fused Deposition Modeling [2].

W/w przyrostowe techniki szybkiego prototypowania działają na tej samej zasadzie dzielenia wcześniej przygotowanego modelu geometrycznego na warstwy poziome, z których budowany jest prototyp. Różnią się ze względu na zasadę działania - przebieg procesu, jak również ze względu na przetwarzany materiał.

#### Metoda SLA

Wytwarzanie prototypu za pomocą stereolitografii rozpoczyna się od przygotowania pliku modelu CAD w formacie STL, który pozwala na zapis powierzchni za pomocą trójkątów połączonych ze sobą ścianami.

Konfiguracja procesu w urządzeniu SLA polega m.in. na ustawieniu modelu na platformie roboczej, doborze struktur podpierających oraz określeniu parametrów procesu. W trakcie konfiguracji następuje także podział modelu na warstwy w poziomej płaszczyźnie XY. Proces SLA polega na budowaniu modelu warstwa po warstwie (0,1 – 0,15 mm) za pomocą polimeryzacji ciekłej żywicy wiązką lasera. Ponieważ istnieje konieczność oddzielenia prototypu od platformy roboczej po zakończeniu procesu, wymagane jest stworzenie struktur podpierających. Obróbka wykańczająca obejmuje usunięcie podpór, umycie modelu w acetonie lub izopropanolu oraz dodatkowe naświetlenie światłem UV w celu dokończenia polimeryzacji w całej objętości modelu [3, 6].



Rys.4. Prototypy implantów wykonane metodą stereolitografii.



W procesie stereolitograficznym stosuje się żywice epoksydowe oraz akrylowe. Fotoutwardzalne biomateriały wykorzystywane w procesach SLA wykazują odpowiednie właściwości mechaniczne oraz biokompatybilność wymagane w aplikacjach medycznych. Modele implantów ubytków zostały wykonane w Laboratorium Szybkiego Prototypowania na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej przy użyciu urządzenia SLA-250 firmy 3D Systems (rys. 4).

### **Metoda PolyJet**

W procesie PolyJet w przeciwieństwie do stereolitografii ciekły fotonolimer jest nakładany, a następnie utwardzany światłem UV. Głowica drukująca w trakcie procesu porusza się w osiach X i Y, dzięki czemu możliwe jest uzyskanie cienkiej (16  $\mu\text{m}$ ) warstwy, co istotnie wpływa na gładkość powierzchni prototypu. W trakcie budowania modelu używane są dwa rodzaje materiału: jeden do wytwarzania właściwego prototypu i drugi jako materiał pomocniczy w celu generowania konstrukcji podpierających. Po zakończeniu procesu materiał pomocniczy jest całkowicie usuwany za pomocą wody pod wysokim ciśnieniem. Zaletami tej metody są krótki czas wytwarzania modelu oraz szeroka gama możliwych materiałów, żywic: akrylowych, sztywnych i elastycznych [4, 6].

Prototypy ubytków wraz z implantami wykonano w urządzeniu EDEN 260 V, którym dysponuje Laboratorium Szybkiego Prototypowania Politechniki Rzeszowskiej (rys. 5).



Rys. 5. Prototypy PolyJet fragmentów czaszek wraz z uzupełnieniami ubytków.

### **Metoda FDM**

Prototypowanie metodą FDM, podobnie jak w poprzedniej technice, polega na budowaniu modelu warstwami poprzez natryskiwanie materiału za pomocą podgrzewanej dyszy. Dysza posiada możliwość przemieszczania się w poziomie i pionie, co umożliwia ułożenie warstwy materiału zgodnie z zadaną geometrią przekroju, uzyskaną z pliku STL. Nakładana warstwa stygnie natychmiast po wypłynięciu z dyszy, wiążąc się z wcześniej ułożoną. Procedura powtarza się po wcześniejszym obniżeniu stołu o grubość warstwy. W tym procesie urządzenie nanosi na przemian materiał bazowy i podpierający. Konstrukcja podpierająca usuwana jest po wykonaniu całego prototypu. Możliwe jest

wykonanie podpór z materiału rozpuszczalnego w wodzie, co znacznie ułatwia ich usunięcie [5, 6].

Metoda ta w odróżnieniu od pozostałych technik szybkiego prototypowania pozwala na uzyskiwanie wytrzymałych modeli wprost po wyjęciu z urządzenia. Prototypy FDM są wysoce funkcjonalne – łatwo poddają się obróbce (np.: wierceniu, szlifowaniu), są trwałe i odporne na działanie wody, substancji chemicznych czy temperaturę.

W procesie prototypowania wykorzystano maszynę uPrint firmy Dimension. Implanty wykonano w tym samym laboratorium co poprzednie modele (rys. 6). Materiałami najczęściej stosowanymi w tej technologii są: ABS, PC oraz ich pochodnych. Modele wykonane z materiałów biokompatybilnych mogą być bezpośrednio zastosowane w trakcie zabiegu operacyjnego.



Rys. 6. Modele wykonane techniką FDM.

## Metoda SLS

Założenia technologii SLS są podobne jak w przypadku stereolitografii – utwardzenie powierzchni materiału wiązką lasera. W metodzie tej wykorzystuje się sproszkowany materiał termoplastyczny, rozprowadzany warstwami na platformie roboczej za pomocą wałka. Promień lasera powoduje spieknięcie warstwy zgodnie z zadanymi granicami i wypełnieniem przekroju bryły. Po utwardzeniu następuje obniżenie platformy o grubość warstwy i ponowne rozprowadzenie proszku. Przy utwardzaniu kolejnej warstwy następuje nadtopienie warstwy poprzedniej, dzięki czemu powstaje jednolita bryła modelu. Po wykonaniu całego elementu następuje usunięcie proszku, który nie został poddany spiekaniu. Tworzony model jest podpierany przez proszek wypełniający przestrzeń roboczą, dlatego nie są wymagane oddzielne struktury podpierające.

W technice SLS nie są wymagane końcowe operacje technologiczne jednak otrzymany model jest porowaty. Z tego powodu w zależności od funkcji modelu stosuje się nasączenie go innymi materiałami, co prowadzi do polepszenia jego właściwości mechanicznych.

Znaczącą niedogodnością tej metody jest wymagany czas chłodzenia modelu przed wyjęciem go z przestrzeni roboczej urządzenia i usunięciem niezwiązanego proszku. W przypadku dużych elementów o skomplikowanej kształcie może to zająć nawet 2 dni.

Materiałami stosowanymi w metodzie SLS są : poliamid (PA), poliamid wzmocniony włóknem węglowym, alumide (mieszanina poliamidu i proszku aluminiowego), włókno szklane poliamidu (PA-GF), polistyren (PS), poliwęglan (PW), proszki Fe-Cu mieszaniny proszków metali i ceramicznych. Do zastosowań medycznych została dopuszczona pochodna nylonu [6].

### Metoda 3DP

3D Printing to technologia, w której głowica drukuje cienką warstwę materiału jedna po drugiej, nanosząc warstwę spoiwa na luźną warstwę proszku. Odpowiednia ilość proszku pobierana jest ze zbiornika i wyrównywana przy pomocy walca na powierzchni platformy roboczej. Na tak przygotowaną warstwę proszku nanoszone jest spoiwo za pomocą ruchomej głowicy. Lepiszcze wiąże ziarna proszku na obszarze zgodnym z przekrojem poprzecznym elementu. W ten sposób powstaje warstwa modelu. Następnie platforma robocza obniża się o grubość warstwy (0,1mm) i proces zostaje powtórzony.

Niezwiązany proszek, stanowi wypełnienie pustych przestrzeni i jednocześnie pełni funkcję podpór. Gotowy model zostaje oczyszczony z proszku za pomocą pędzla, wyciągnięty z obszaru roboczego i poddany dokładnemu oczyszczaniu w komorze ze sprężonym powietrzem.

Ze względu na jego niską wytrzymałość mechaniczną oraz kruchość modelu w kolejnym etapie procesu następuje jego utwardzenie. Dla uzyskania pożądanych właściwości wydruk nasączany jest substancjami (infiltratorami) zwiększającymi ich wytrzymałość mechaniczną lub elastyczność. Do tego celu wykorzystywane są takie materiały jak wosk, żywice akrylowe i żywice epoksydowe. Wadą metody jest brak możliwości odwzorowania cienkościennych struktur wewnętrznych i zewnętrznych [1, 6]. W technologii 3DP wykorzystywane są proszki metali, proszki ceramiczne oraz kompozytowe (metalowo-ceramiczne). Ze względu na materiały, z których wykonane są prototypy metoda ta może być stosowana jako etap pośredni w wykonaniu odlewów implantów. Prototypy wykonano w Laboratorium Szybkiego Prototypowania PRz przy użyciu drukarki Z-510 firmy Z-Corporation (rys. 7).



Rys. 7. Prototypy 3DP fragmentu czaszki z implantem.

## 4. PODSUMOWANIE

Zastosowanie inżynierii odwrótej umożliwia uzyskiwanie wysokiej dokładności modeli numerycznych, w połączeniu z technologiami RP uzyskujemy możliwość wygenerowania funkcjonalnych prototypów wszelkiego rodzaju sztucznych kończyn czy implantów, w tym także ubytków czaszkowych.

Wspomaganie medycyny za pomocą technik RE oraz RP ma znaczący wpływ na wydajność pracy lekarzy. Wykorzystując w/w metody możliwe jest skrócenie czasu przedoperacyjnego oraz operacyjnego, znaczne zmniejszenie ryzyka wystąpienia komplikacji w trakcie zabiegu operacyjnego, oraz powikłań pooperacyjnych, co także wiąże się także z obniżeniem kosztów.

## LITERATURA

- [1] Budzik G., Markowska O., Gardzińska A.: Rapid Prototyping Method (3DP) Adapted to Implement Cranial Decreases in Advanced Technologies in Production Engineering (pod red. J. Józwicka), POLITECHNIKA LUBELSKA s.112-121, 2009.
- [2] Wohlers T.: Wohlers Report 2008 – State of the industrial, annual worldwide progress report, Wohlers Associates, Fort Collins, CO, USA 2008.
- [3] Fuh J.Y.H., Lu L., Tan C.C., Shen Z.X. et.al.: Processing and characterising photosensitive polimer In the Rapid Prototyping process, Journal of Materials Processing Technology 89-90 (1999), Elsevier, s. 211-217.
- [4] <http://www.objet.com/>
- [5] <http://www.stratasys.com/>
- [6] <http://www.materialise.com/>



**Badania realizowane w ramach „Podkarpackiego funduszu stypendialnego dla doktorantów”. Projekt współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.**