



Zastosowanie technologii przyrostowych w medycynie rekonstrukcyjnej twarzoczaszki

The use of additive technologies in maxillofacial reconstructive medicine

Kacper Bębenek¹, Anna Błaszczuk¹, Jan Kiryk¹, Dawid Kotowski¹, Katarzyna Kowalska¹, Tomasz Szczygieski¹, Andrzej Pawlak², Patrycja Szymczyk², Maciej Dobrzyński³, Zbigniew Rybak⁴

¹Studenckie Koło Naukowe Stomatologii Eksperymentalnej i Badania Biomateriałów, Uniwersytet Medyczny im. Piastów Śląskich we Wrocławiu, ul. Poniałowskiego 2, 50-236 Wrocław

²Zakład Mechatroniki, Automatyzacji i Organizacji Produkcji, Politechnika Wrocławska, ul. Łukasiewicza 5, 50-371 Wrocław

³Katedra i Zakład Stomatologii Zachowawczej i Dziecięcej, Uniwersytet Medyczny im. Piastów Śląskich we Wrocławiu, ul. Krakowska 26, 50-425 Wrocław, tel. +48 71 784 03 78, e-mail: maciejdobrzynski@op.pl

⁴Zakład Chirurgii Eksperymentalnej i Badania Biomateriałów, Uniwersytet Medyczny im. Piastów Śląskich we Wrocławiu, ul. Poniałowskiego 2, 50-236 Wrocław

Streszczenie

Technologie przyrostowe *additive technologies* (potocznie zwane drukiem 3D) ze względu na wysokie koszty nie są szeroko wykorzystywane w krajowej medycynie regeneracyjnej. Jako inne powody podawane są: brak potrzeby ich stosowania, obawy lekarzy przed korzystaniem z tej metody, brak szkoleń oraz rzetelnych źródeł wiedzy. Wysoki koszt procedury wynika z cen urządzeń, odpowiedniego oprogramowania komputerowego pozwalającego na obróbkę danych pochodzących ze zdjęć z TK czy MRI oraz konieczności usunięcia artefaktów.

W przeciwieństwie do dotychczasowych metod, gdzie obiekty były wytwarzane poprzez subtrakcję materiału lub zmianę jego kształtu podczas przeróbki plastycznej, w każdej z technik należących do technologii przyrostowych, obiekty uzyskuje się wskutek dołączania materiału. W zależności od wykorzystanej technologii materiał łączony jest warstwa po warstwie, bazując na kolejnych przekrojach modelu 3D, tam gdzie zachodzi taka potrzeba, dając finalnie pożądaną kształt przestrzenny.

Gotowe obiekty mogą zostać wykorzystane do celów diagnostycznych (np. określenia zasięgu zmian nowotworowych, pourazowych), zaplanowania zabiegu (możliwość przestrzennego zobrazowania gotowego implantu, struktur otaczających, symulacji dostępu operacyjnego i procedury zabiegowej), a także wytworzenia implantów przydatnych w rekonstrukcji chorobowo bądź urazowo zniszczonych elementów szkieletu.

Celem niniejszej pracy było przedstawienie możliwości zastosowania powyższej metody w medycynie rekonstrukcyjnej twarzoczaszki.

Słowa kluczowe: technologie przyrostowe, medycyna rekonstrukcyjna, twarzoczaszka, rekonstrukcja oczodołu, rekonstrukcja żuchwy, stomatologia

Abstract

The additive technologies (commonly called as 3D printing) due to the high costs are not widely used in the national regenerative medicine. As the other reasons are mentioned: no need to apply them, fear of doctors from using this method, lack of training as well as reliable sources of knowledge. The high cost of the procedure results from the prices of equipment, appropriate computer software which allows for processing data derived from images with CT or MRI and finally the need of artifacts removing.

In contrast to previous methods, where the objects are produced by subtraction of material or change its shape during plastic forming, each of the techniques belonging to the additive technology, obtained objects are the result of attaching material. Depending on the technology, used material is connected layer by layer, based on sequential sections of the 3D model, where necessary, to give finally the desired three-dimensional shape.

Generated objects can be used for diagnostic purposes (eg. determination of the extent of tumor or injury), planning the surgery (possibility of the dimensional visualization of the final implant and surrounding structures, simulation of surgical approach and surgical procedures) as well as produce implants useful in the reconstruction of pathologically or traumatically destroyed skeleton elements.

The aim of this study was to present the applicability of this method in craniofacial reconstructive medicine.

Key words: additive technologies, reconstructive medicine, maxillofacial skeleton, orbital reconstruction, mandible reconstruction, dentistry

otrzymano / received:

21.10.2015

poprawiono / corrected:

16.11.2015

zaakceptowano / accepted:

26.11.2015



Wprowadzenie

Technologie przyrostowe (*additive technologies*) polegają na wytwarzaniu obiektów przestrzennych poprzez nakładanie materiału w miejscach, gdzie tworzy on jego objętość [1]. Wykonywane jest to metodą warstwa po warstwie, która bazując na kolejnych przekrojach modelu, uzyskanych w kierunku narastania kolejnych warstw, łączy materiał w jedną całość obiektu. Grubość stosowanej warstwy determinuje jego dokładność względem modelu zaprojektowanego w systemie CAD – im mniejsza grubość warstwy, tym ich więcej, a tym samym dyskretyzacja modelu jest dokładniejsza [2, 3].

Do produkcji obiektów w technologiach przyrostowych można wykorzystać wiele rodzajów materiałów, wśród których wyróżniamy metale, ceramikę i tworzywa sztuczne, których różnorodność ciągle rośnie. Stosowany materiał do wytworzenia obiektu w technologii przyrostowej ogranicza nam wybór wykorzystywanej techniki. W zależności od rodzaju materiału, przybierać on może różne postaci, jak: proszek (ceramika, tworzywa sztuczne, metale i ich stopy), drut (tworzywa sztuczne) czy stan ciekły (żywice fotoczułe). Materiały proszkowe mogą być stapiane całkowicie (metale) lub częściowo (tworzywa sztuczne – całkowite stopienie prowadziłoby do rozpadu łańcucha polimerowego) przez źródła skupionej energii – wiązka lasera, elektronów – technologie SLS (*Selective Laser Sintering*), SLM (*Selective Laser Melting*), EBM (*Electron Beam Melting*) lub sklepane lepiszczem (3DP) [4]. Przykładem biokompatybilnego metalicznego materiału proszkowego jest stop tytanu Ti-6Al-7Nb. Do jego zalet należą: duża odporność korozyjna, dobra wytrzymałość zmęczeniowa oraz właściwości paramagnetyczne. W przeciwieństwie do stopu poprzedniej generacji Ti-6Al-4V, nie zawiera jonów wanadu indukujących proces zapalny, którego konsekwencją jest osteoliza w sąsiedztwie wszczepu.

Technologie wykorzystujące drut z tworzywa sztucznego są najpopularniejszymi technologiami pod względem sprzedawanych urządzeń, często klientom prywatnym, ze względu na ceny urządzeń i materiałów (Fot. 1). Wykorzystują one ruchomą głowicę, która podgrzewa podawany drut do temperatury uplastycznienia i nakłada go na wcześniej ułożone warstwy – technologia FFF (*Fused Freeform Fabrication*) lub zarejestrowana przez firmę Stratasys nazwa własna FDM (*Fused Deposition Modelling*) [5, 6]. Dostępność tego typu urządzeń dla osób niezwiązanych profesjonalnie z technologiami przyrostowymi upowszechniło stosowanie określenia druk 3D, który tłumaczony dosłownie może być mylony z technologią 3D Printing działającą w określony sposób i należącą do grupy technologii przyrostowych. Żywice na bazie tworzyw sztucznych mogą być stosowane w stereolitografii (SL) – najstarszej z technologii przyrostowych, gdzie w wannie żywicy zanurzana jest platforma procesowa o grubości warstwy poniżej lustra materiału, a następnie skupiona wiązka światła UV scala materiał w przekroju. Inną technologią wykorzystującą żywice światłoutwardzalne jest Polyjet, w której materiał nakładany jest przez ruchome dysze, niczym

w tradycyjnych drukarkach atramentowych, jednak mimo gęstości i lepkości materiału, możliwe jest tworzenie przestrzennych obiektów na platformie procesowej [4]. Materiały na bazie ceramiki i tworzyw sztucznych mogą służyć do wykonania prototypu modelu w celu zaprezentowania lekarzowi wyglądu implantu bądź rozległości uszkodzeń kości.

Materiały metalowe są stosowane w postaci proszkowej, które w urządzeniu realizującym proces przyrostowy są stapiane przez źródło energii. Kolejne topione cząsteczki proszku tworzące mikroskopową fazę ciekłą zastępyją, łącząc się w przetwarzany przekrój warstwy. Tak wytworzony implant ze stopu biogodnego materiału można umieścić w ciele pacjenta po niewielkiej obróbce podprocesowej [7].

W czaszkowo-twarzowej chirurgii rekonstrukcyjnej powszechnie wykorzystywanymi materiałami są: autogenna kość (tzw. złoty standard), siatki tytanowe, allogenne i ksenogenne materiały, polietylen i wiele innych. Wymogi stawiane tym materiałom to biokompatybilność, łatwość aplikacji, nietoksyczność, hipoalergicznosc, stabilność kształtu. Dodatkowe wymagania wobec materiałów używanych w rekonstrukcji to precyzja w formowaniu, adaptowaniu, trwałość w podporze tkanek [8, 9].

Projektowanie tytanowych implantów w postaci siatki oparte na modelach anatomicznych oczodołów uzyskanych dzięki danym z CT i przetworzonych poprzez odpowiednie oprogramowanie jest skuteczną i szeroko stosowaną metodą. Jednak czasem zdarza się, że cienkie implanty są przemieszczone bądź zdeformowane, szczególnie w przypadkach ciężkich uszkodzeń struktur kostnych, gdzie tytanowe siatki nie mogą być dokładnie ustabilizowane. Dlatego niektórzy badacze zdecydowali się na użycie implantów polietylenowych (UHMW-PE) własnej inwencji z odpowiednimi zgrubieniami, aby zachować objętość i otrzymać stabilność ścian oczodołów. Jednak początkowo materiał ten posiadał wadę polegającą na zbyt dużym skurczu podczas tworzenia. Dziś rozwiązano ten problem przez wytwarzanie implantów z większych prefabrykowanych blozków obrabianych komputerowo [10].

Zastosowanie indywidualnie dla pacjenta zaprojektowanych implantów z polietylenu UHMW-PE (Fot. 2) to obiecująca droga do prawidłowej rekonstrukcji 3D. Materiał ten pozwala na korektę objętości odtwarzanych struktur kostnych i jest odporny na śródoperacyjne deformacje, jednakże jest niewidzialny w promieniach X, co stwarza trudności w ocenie pozycji implantu i wpływu na rezultat końcowy [9, 11].

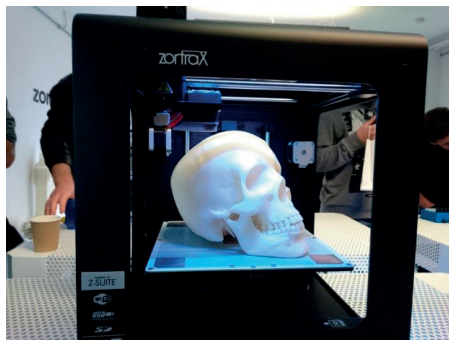
Kolejną zaletą materiału jest jego sztywność zapewniająca możliwość odbudowy stosunkowo dużych ubytków kostnych, tj. dolna ściana oczodołu. Model anatomiczny wykonany przy wyprodukowaniu implantu polietylenowego może służyć pomocą chirurgowi podczas operacji (śródoperacyjne narzędzie nawigacyjne). Innymi zaletami UHMW-PE są łatwa korekcja skalpelem lub nożyczkami oraz mała liczba powikłań. W czasie projektowania z użyciem systemu CAD łatwo i bardzo precyzyjnie można modyfikować grubość implantu. Metoda ta pozwala uzyskać polietylenowe wszczepy o zaokrąglonych brzegach i gładkim



Zastosowanie technologii przyrostowych w rekonstrukcji oczodołu

przejściu pomiędzy częściami o różnej grubości, co sprzyja lepszemu gojeniu. Oczywiście oprócz zalet metoda ta ma również wady, do których należą m.in.: długi czas projektowania i produkcji implantu, brak możliwości zmiany krzywizny, kształtu lub wielkości wszczepu z tego materiału podczas operacji (warunkuje to wykonanie większego implantu niż rzeczywisty wymiar wady). Istnieje także konieczność dodatkowego ustabilizowania położenia wszczepu UHMW-PE poprzez śrubę podczas początkowego okresu gojenia [11].

Implanty z polietyleny można poddawać modyfikacji cząsteczkami Ti. Do tego celu można użyć manualnej sonotrody (zgrzewarki ultradźwiękowej). Umożliwia to uwidocznienie implantu w badaniach rentgenowskich i tomografii komputerowej. Wyższość tej metody nad zastosowaniem standardowych siatek tytanowych jest oczywista. Charakterystycznymi bowiem cechami standardowej siatki są: znaczna wytrzymałość na rozciąganie, ciągliwość, łatwość ulegania deformacji podczas zabiegu. Ponadto podczas użycia tytanowej siatki mogą powstać komplikacje będące wynikiem zmiany topografii nerwu wzrokowego. Trzeba również rozważyć aspekt psychologiczny, ponieważ istnieje pewna grupa pacjentów, która nie toleruje metalicznych materiałów alloplastycznych. Alternatywa z indywidualnym polietylenowym, modyfikowanym cząsteczkami tytanu implantem doskonale eliminuje wyżej wymienione wady standardowej siatki tytanowej. Badania sugerują, że powyższa modyfikacja może zostać w przyszłości użyta przez ortopedów i chirurgów twarzowo-szczękowych do operacji rekonstrukcyjnych [9].



Fot. 1 Drukarka 3D

Źródło: <http://www.spidersweb.pl/2014/10/polska-drukarka-3d-zortrax-krakow.html>



Fot. 2 Polietylen medyczny UHMW-PE

Źródło: <http://news.directindustry.com/press/repack-s/ultra-high-molecular-weight-polyethylene-uhmw-pe-38681-433278.html>

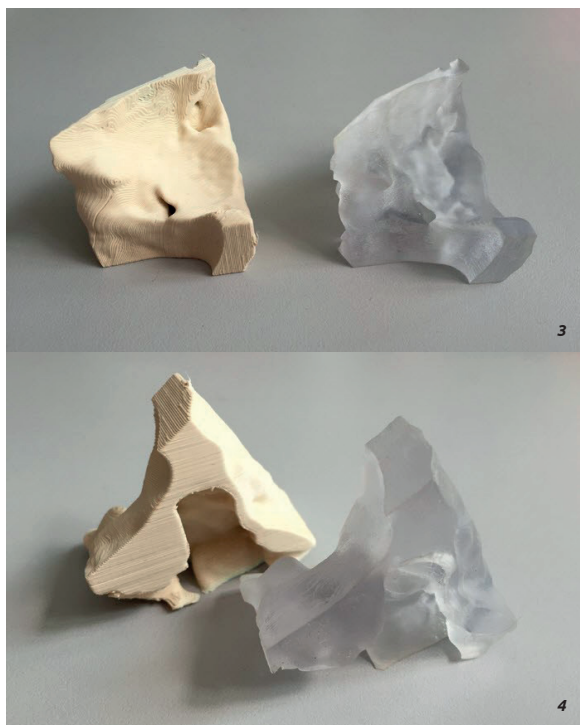
Jednym z częstych powikłań wypadków komunikacyjnych, operacji onkologicznych w obrębie twarzoczaszki oraz zamierzonego uszkodzenia ciała drugiej osoby związanego ze złamaniem prawa jest zniszczenie ściany oczodołu – struktury kostnej charakteryzującej się skomplikowanym kształtem. Objawami utraty ciągłości kości budujących oczodół mogą być deformacje twarzy oraz zaburzenia widzenia. Rekonstrukcja rusztowania kostnego oczodołu umożliwia wyeliminowanie zaburzeń morfologiczno-czynnościowych ze strony narządu wzroku oraz odtworzenie estetyki twarzy, której brak prowadzi często do zaburzeń na tle psychologiczno-emocjonalnym, zwłaszcza braku samoakceptacji i depresji. Odbudowę umożliwia obraz z tomografii komputerowej o wysokiej rozdzielczości, który pozwala na stworzenie indywidualnego implantu dostosowanego do anatomii pacjenta [10, 13, 14].

Dotychczas stosowana metoda rekonstrukcji polegała na zastąpieniu uszkodzonej kości tytanową siatką, która wymagała odpowiedniego wyprofilowania. Lekarze lub wyszkoleni technicy odpowiednio ją formując i przycinając w trakcie operacji, podejmowali próbę jak najdokładniejszego dopasowania jej kształtu do struktury oczodołu. Z powodu złożonej anatomii powyższe zabiegi cechują się znaczną trudnością. Przy zastosowaniu siatki efekt operacji uzależniony jest w dużej mierze od wyobraźni przestrzenno-estetycznej operatora oraz od zdolności kreowania obrazu kości sprzed uszkodzenia. Nie są odosobnionymi przypadkami złego dopasowania siatki, co skutkuje koniecznością kolejnej operacji celem odtworzenia estetyki zarówno kostnej, jak i tkanek miękkich, dla których wszczep stanowić będzie rusztowanie [10, 14].

W Polsce istnieją specjalistyczne ośrodki zajmujące się projektowaniem i tworzeniem indywidualnych implantów medycznych. Wykorzystują one metody analizy i wytwarzania przyrostowego, które umożliwiają odtworzenie struktury oczodołu sprzed urazu. Na podstawie tomografii komputerowej zdrowego oczodołu tworzone jest jego odbicie lustrzane, które staje się punktem wyjścia do rekonstrukcji uszkodzonej struktury. Na wyprodukowanym obiekcie możliwe jest dokładne dogięcie siatki tytanowej służącej do odbudowy oczodołu (Fot. 3, 4). Inną metodą jest bezpośrednie wykonanie z użyciem technik przyrostowych polietylenowego implantu, który po poddaniu sterylizacji, może zostać wszczepiony w miejsce uszkodzeń. Druga ze wspomnianych metod umożliwia niemal idealne odwzorowanie kości sprzed urazu, bowiem kość ludzki wykazuje symetrię. Implant jest projektowany na bazie skanu z tomografii komputerowej, następnie projekt podlega modyfikacjom zgodnie z zaleceniami specjalisty i implant jest wytwarzany za pomocą technologii przyrostowych z biogodnego materiału. Gotowy implant poddaje się procesowi sterylizacji, co umożliwia jego bezpieczne wszczepienie. Metoda ta skraca czas operacji, zmniejsza ryzyko powikłań, przywraca estetykę twarzy, a jej efekt jest tolerowany

przez pacjentów. Wykazano również, iż czas rekonwalescencji przy użyciu wszczepów z polietylenu medycznego jest krótszy niż w technice tradycyjnej rekonstrukcji [10, 12].

Nowatorskim rozwiązaniem używanym w rekonstrukcji kości twarzoczaszki jest urządzenie haptyczne, pozwalające na przygotowanie wirtualnych modeli anatomicznych oraz projektowanie implantów jeszcze sprawniej niż dotychczas opisane metody. Aparaty te wykorzystują czujniki rejestrujące kierunek, prędkość oraz siłę ruchu. Urządzenie, poprzez komunikację z komputerem, pozwala na percepcję fizyczną (dotyk) oraz rzeźbienie w modelach 3D z użyciem wirtualnej gliny. Dzięki temu możliwy jest odbiór oporu poprzez użytkownika. Pozwala to na dokładniejsze wykreowanie implantów medycznych oraz skracając czas procedury [15].



Fot. 3, 4 Modele 3D fragmentów kostnych oczodołu

Źródło: [http://centrumdruku3d.pl/wejdz-w-moje-drukowane-buty-czyli-michalina-i-adela-zamieniaja-sie-drukarkami-3d/#prettyPhoto\[gal_3\]/10/](http://centrumdruku3d.pl/wejdz-w-moje-drukowane-buty-czyli-michalina-i-adela-zamieniaja-sie-drukarkami-3d/#prettyPhoto[gal_3]/10/)

Znaczenie technologii przyrostowych w chirurgicznej korekcji wad wrodzonych

Technologie przyrostowe mogą być również wykorzystywane do chirurgicznej korekcji wad wrodzonych kości twarzoczaszki. Najszerzej zbadanym zabiegiem jest korekcja hipertelorizmu ocznego. Jest on definiowany jako zwiększenie odległości między przyśrodkowymi ścianami oczodołów [14]. Przyczynami zwiększonego odstępu między gałkami ocznymi mogą być: zahamowanie wzrostu skrzydeł większych kości klinowej w embriogenezie (w rezultacie skrzydła mniejsze są rozstawione szerzej, a ściany oczodołów – bardziej oddalone), zaburzenie rozwoju struktur anatomicznych nosa (w przestrzeń tę wnika pierwotny

pęcherzyk mózgowy, co zatrzymuje gałki oczne w nieprawidłowych lokalizacjach), a także zaburzenia kostnienia podstawy czaszki, jak ma to miejsce w zespołach z przedwczesnym zamknięciem szwów czaszkowych (zespół Crouzona, zespół Aperia) [15, 16]. Korekcie przeprowadzane są z zastosowaniem techniki wykorzystującej przestrzenne modele anatomiczne, które znacząco umożliwiają przedoperacyjne planowanie złożonych czaszkowo-twarzowych procedur w chirurgii szczękowo-twarzowej. Wprowadzenie tej metody do chirurgii pozwoliło skrócić czas zabiegu, dokładnie zaplanować lokalizację osteotomii i precontouring materiału kościotwórczego. Wygląd twarzy po takiej operacji ulega widocznej poprawie. Jednakże całkowite wyleczenie hipertelorizmu nie jest wykonalne. Możliwa jest natomiast znaczna poprawa czynności wzrokowych w przypadkach, w których nie doszło do zaniku nerwu wzrokowego [17].

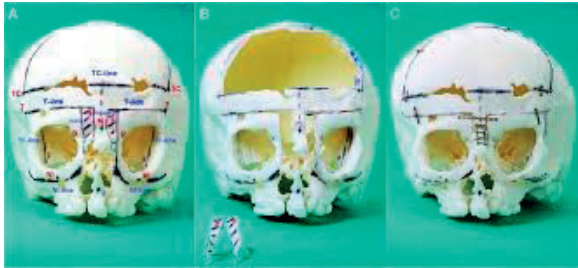
Leczenie ocznego hipertelorizmu wiąże się z redukcją odległości międzygałkowej poprzez repozycję oczodołów. Ważnego przełomu w chirurgicznej korekcji ocznego hipertelorizmu dokonał Tessier w 1967 roku, kiedy to zauważył, że wewnątrzczaszkowy dostęp jest niezbędny, by zapewnić bezpieczne i efektywne przemieszczenie oczodołów. Tylko w taki sposób oczodół może zostać przemieszczony z każdej strony w kierunku linii środkowej [18]. Jako że dostęp chirurgiczny w korekcji hipertelorizmu jest wciąż dużym wyzwaniem, przedoperacyjne modelowanie z użyciem technologii przyrostowych jest istotnym ułatwieniem dla chirurgów czaszkowo-twarzowych. Najpowszechniej stosowanymi technikami są: stereolitografia i technologia 3D Printing, z których ta druga okazuje się zwykle lepsza ze względu na większą precyzję, szybsze drukowanie i mniejsze koszty [19]. Uzyskany w ten sposób model czaszki stwarza możliwość obserwacji zaburzeń pod dowolnym kątem. Realizm przestrzenny i dotykowe możliwości tych modeli stwarzają tzw. „wirtualną rzeczywistość” dla chirurga, który zyskuje wizualny i dotykowy dostęp do nadchodzącej operacji bez potrzeby dotykania i oglądania pacjenta [20]. Trójwymiarowe techniki modelowania są pomocne w minimalizacji chirurgicznego dostępu, co oszczędza czas operacji i pomaga zrozumieć rodzinie pacjenta procedury chirurgiczne. Istnieje możliwość wcześniejszej wirtualnej symulacji mini- i mikroprotez w celu precyzyjnego umieszczenia tychże protez lub innych prefabrykowanych implantów. Metoda ta – wykorzystywana do określenia linii osteotomii – umożliwia określenie miejsc, w których będą wstawione przeszczepy kostne, a także ukształtowanie tychże przeszczepów.

Optacalną, ale czasochłonną alternatywą dla wytwarzania przestrzennych obiektów w technologiach przyrostowych jest zastosowanie tomografii komputerowej i wirtualnych rekonstrukcji 3D w przedoperacyjnej ocenie oraz optymalizacja techniki chirurgicznej korekcji hipertelorizmu. Taki system stwarza możliwość symulacji i planowania osteotomii oraz zmian w oryginalnym obrazie zgodnie z normalnymi pomiarami odpowiednimi do wieku każdego pacjenta. Przy porównaniu wyników komputerowej symulacji z pooperacyjnymi rekonstrukcjami zaobserwowano znaczące podobieństwo w obu obrazach [17]. Co



więcej, ruch 3D także może podlegać symulacji. Komputerowa interaktywna symulacja operacji (CISSS – *Computer-based interactive surgery simulation system*) umożliwia wizualizację zabiegu i zmian na twarzy po korekcie ocznego hipertelorizmu [21].

Zastosowanie technologii modelowania przy pomocy technologii przyrostowych do chirurgicznego planowania ciężkich czaszko-twarzowych deformacji (w tym hipertelorizmu) dostarcza różnorodne korzyści. Przedoperacyjny model pomaga zredukować czas zabiegu, określić wymiary i lokalizację osteotomii oraz określić zarys kościotwórczy materiału, niezbędny do utrwalenia zaktywowanych segmentów kostnych (Fot. 5).



Fot. 5 Model 3D czaszki służący jako model diagnostyczny do zaplanowania operacji korygującej hipertelorizm

Źródło: Z materiałów dr. Engela i wsp., *Oral Maxillofac Surg.* (2015) 19:91-95. doi: 10.1007/s10006-014-0466-1

Zastosowanie technologii druku 3D w rekonstrukcjach żuchwy

Technologie przyrostowe, zwłaszcza stereolitografii, znalazły szerokie zastosowanie w operacjach rekonstrukcyjnych żuchwy po hemisekcji, mandibulektomii oraz operacyjnym usunięciu nowotworów głowy i szyi. Problem odtworzenia estetyki po wykonaniu zabiegu wycięcia rozległej części żuchwy jest w środowisku medycznym powszechnie znany. Wynika on głównie z powodu złożonego kształtu przestrzennego kości, co znacznie utrudnia rekonstrukcję, która umożliwiłaby jak największe odtworzenie funkcji estetycznej układu stomatognatycznego (US). Dodatkowymi aspektami są pozostałe funkcje US, przede wszystkim problematyczne jest zapewnienie przez wszczep prawidłowości zwarcia. W porównaniu z tradycyjnymi metodami rekonstrukcyjnymi metody wykorzystujące technologie przyrostowe są tolerowane przez pacjentów i umożliwiają dokładniejsze odwzorowanie funkcji US oraz wyglądu twarzy sprzed zaistnienia czynnika skutkującego koniecznością usunięcia części żuchwy [22].

Komputerowo wspomagane techniki CAx (*Computer Aided*) są wykorzystywane w zabiegach rekonstrukcyjnych żuchwy na dwóch poziomach szeregu procedur przygotowawczych i wykonawczych. Niezależnie od wybranej metody rekonstrukcji (płytki tytanowe, polimery, tworzywa sztuczne, przeszczep autogeny z kości strzałkowej) technologia wizualizacji w przestrzeni trójwymiarowej pozwala na stworzenie modelu na bazie zgromadzonych danych medycznych pacjenta. Model taki pozwala na dokładne zaplanowanie zabiegu, wybór metody i umożliwia

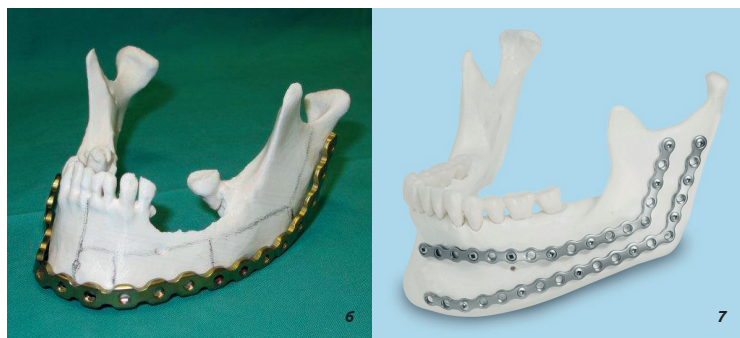
dzięki temu niezwykle dokładną rekonstrukcję, która spowoduje możliwie minimalne zmiany w estetyce dolnego piętra twarzy. Należy przy tym pamiętać, że za estetykę odpowiadają nie tylko tkanki twarde stanowiące rusztowanie, lecz również sposób układania się na nich tkanek miękkich, których nieprawidłowe ułożenie (zbyt luźne lub napięte) powoduje zauważalne oszpeccenie [23].

Modele żuchwy wytworzone za pomocą stereolitografii są wykorzystywane w celach diagnostycznych oraz planowania rekonstrukcji. Stanowi najdokładniejszą metodę kształtowania przyrostowego [24]. Alternatywą jest konwencjonalna obróbka skrawaniem. Dzięki wytworzeniu modelu na bazie trójwymiarowej tomografii komputerowej chirurg uzyskuje możliwość przedoperacyjnego zaplanowania rozległości zabiegu, rodzaju prowadzonych cięć na strukturze odpowiadającej żuchwie pacjenta, a nie tylko na dwuwymiarowych rzutach tomografii komputerowej. Model może być również wykorzystany do zaplanowania rekonstrukcji, umożliwia bowiem określenie wielkości resektowanego fragmentu żuchwy, jak i przebiegu dolnej krawędzi trzonu, tylnego brzegu gałęzi żuchwy oraz wielkości kąta żuchwy [25]. Często niezbędna jest hemisekcja żuchwy, która pozostawia tylko wyrostek kłykciowy. Konieczność rekonstrukcji po takim zabiegu stanowi rzecz oczywistą i winna być przeprowadzona bezpośrednio po zabiegu chirurgicznego usunięcia połowy żuchwy. Przy rekonstrukcji tak dużego ubytku kostnego należy odwzorować wymienione brzegi i kąt żuchwy po stronie zoperowanej w celu zapewnienia estetyki tkanek miękkich. Wykonuje się wówczas model 3D żuchwy pacjenta na bazie tomografii komputerowej z tą różnicą, że stroną objętą procesem nowotworowym uzyskuje się poprzez lustrzane odbicie w trójwymiarze zdrowej połowy żuchwy. Dzięki temu uzyskujemy model żuchwy indywidualny dla pacjenta, co umożliwia odpowiednie dogięcie materiału wykorzystywanego do rekonstrukcji. Dzięki systemowi CAD/CAM możliwe jest dodatkowe projektowanie i obrabianie modeli po ich pierwotnym wirtualnym (CAD) utworzeniu lub na etapie gotowego modelu, co umożliwia naniesienie poprawek zgodnie z sugestiami specjalisty chirurgii plastycznej. Wiadomym jest, iż twarz każdego człowieka jest w pewnym stopniu asymetryczna i jako taka postrzegana jest za najbardziej estetyczną. Chcąc zapewnić odpowiednie ułożenie tkanek miękkich, można połowę modelu pomniejszyć lub powiększyć, tak aby skonstruowany na jego bazie implant zapewnił odpowiednią estetykę twarzy.

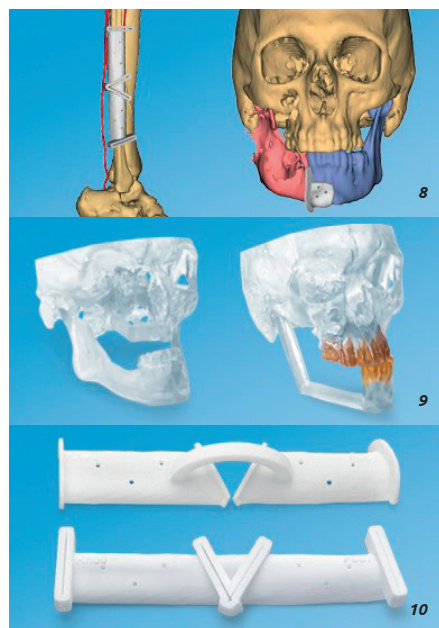
Do najczęściej stosowanych metod odtwórczych żuchwy wykorzystujących technologie przyrostowe należą: odbudowa z użyciem implantów tytanowych doginanych do krzywizny brzegów i kąta żuchwy [26, 27, 28], wszczep modelu wytworzonego z hydroksyapatytu na siatce tytanowej lub rusztowaniu poliamidowych [29, 30] wytworzonych z użyciem metody CAD/CAM oraz przeszczep autogeny z kości strzałkowej doginanej lub składanej z mniejszych fragmentów na prowadnicy z implantu tytanowego [31]. Zaletami powyższych metod są: skrócenie całkowitego czasu trwania zabiegów (przeprowadzenie

rekonstrukcji bezpośrednio po usunięciu fragmentu żuchwy), mniejsze ryzyko zdrowotne dla pacjenta, co wiąże się z mniejszą ilością znieczuleń ogólnych, niemal idealne dopasowanie wszczepu do pozostałych tkanek twardych i zadowalająca estetyka. Materiały używane do implantacji cechuje biogodność i wysoka wytrzymałość mechaniczna, co przywraca utracone funkcje układu stomatognatycznego [19, 25, 26, 28, 32]. Jak każda metoda operacyjnej rekonstrukcji tkanek, również i ta ma wady, do których zalicza się wysoki koszt procedur, konieczność dokładnego planowania zabiegu oraz wymóg wysoko wykwalifikowanego personelu medycznego. Niezbędny jest także skan z tomografii komputerowej o wysokiej dokładności.

Metodą rekonstrukcyjną żuchwy, na którą warto zwrócić szczególną uwagę, jest przeszczep autogennej kości strzałkowej. Procedura ta polega na wytworzeniu obiektu żuchwy pacjenta, bazując na modelu 3D (stronę objętą zmianą odtwarza się metodą odbicia lustrzanego) uzyskanego podczas tomografii komputerowej. Następnie na tak przygotowanym modelu technik dogina implant tytanowy tak, by uzyskać kształt zgodny z przebiegiem krawędzi tylnej gałęzi żuchwy, kąta żuchwy i brzoгу dolnego trzonu żuchwy (Fot. 6, 7). Równolegle tworzony jest drugi model na bazie TK strzałki. Model strzałki obrabia się metodą frezowania w sposób umożliwiający uzyskanie kilku (zwykle trzech) fragmentów kostnych połączonych ze sobą cienkim pasmem unaczynionych tkanek, które można złożyć w sposób pozwalający na odtworzenie kształtu przestrzennego żuchwy (Fot. 8-10). Tak przygotowany szablon poddaje się sterylizacji w autoklawie i używa się go podczas pobierania materiału do przeszczepu jako wzornika, zgodnie z którym chirurg wycina potrzebną ilość tkanki kostnej. Podczas operacji żuchwy, zaraz po wycięciu objętego procesem patologicznym fragmentu kości, przystępuje się do rekonstrukcji. W tym celu najpierw implantowany jest wszczep tytanowy zespalaający pozostawione fragmenty żuchwy, a następnie na jego bazie kształtowany jest przeszczep autogeny pozwalający zachować estetykę po wygojeniu się ran pooperacyjnych i zajęciu procesów remodelingu kostnego oraz dostosowaniu tkanek miękkich do nowego rusztowania kostno-tytanowego [32].



Fot. 6, 7 Modele 3D żuchwy z implantami tytanowymi doginanymi do przebiegu krawędzi i kąta żuchwy
Źródło: KLS Martin®, <http://www.klsmartin.com/products/implants-and-implant-systems/cmf/titanium-osteosynthesis/mandibula/23-mm-smart-shape-system/?l=2>;
Z materiałów dr. Aubry'a i wsp., ECR 2013/C-1473, doi: 10.1594/ecr2013/C-1473



Fot. 8, 9, 10 Trójwymiarowe obrazowanie i planowanie zabiegu rekonstrukcji żuchwy z użyciem przeszczepu autogennej kości strzałkowej. Na zdjęciu 10 wzorniki służące do określenia rozległości potrzebnego fragmentu kości strzałki.
Źródło: TRUMATCH®, <http://sites.synthes.com/intl/css/proplan/midface-recon/pages/default.aspx>

Podsumowanie

Pośród wszystkich urazów w obrębie twarzoczaszki aż 40% obejmuje urazy struktur oczodołu. Zmiany pourazowe w obrębie rusztowania kostnego oczodołu zmieniają funkcje struktur wewnątrzoczodołowych, rozmiary oczodołu, prowadząc do komplikacji morfologiczno-czynnościowo-estetycznych [33]. Przy zastosowaniu współczesnej technologii możliwe jest stworzenie anatomicznych modeli przestrzennych opartych na TK, które są używane jako szablony do tworzenia implantów tytanowych stosowanych później do rekonstrukcji uszkodzeń podstawy oczodołów [34]. Dzięki temu możliwe jest przywrócenie przedurazowej morfologii struktur kostnych oraz zapobieżenie dalszym komplikacjom. Wykorzystywanych do tego celu jest wiele metod chirurgicznych oraz materiałów służących do rekonstrukcji.

Użycie szybkiego prototypowania i możliwość tworzenia modelu oczodołów obniża koszty i ułatwia przedoperacyjne planowanie. Model ten służy jako szablon do tworzenia właściwych implantów, a w czasie zabiegu używa się go do orientacji w aktualnym położeniu implantu oraz do określenia położenia odpowiednich punktów anatomicznych [35]. Model jest zwykle konstruowany jako lustrzane odbicie struktury jednoimiennej, a następnie poddawany komputerowej korekcji.

Etap przedoperacyjny obejmuje docięcie i odpowiednie ukształtowanie tytanowego elementu rekonstrukcyjnego odpowiednio według objawów klinicznych, modelu i danych z CT. Celowe jest pokrycie defektu kości i zapewnienie podparcia dla gałki ocznej.

Podobnie częstym zastosowaniem technologii przyrostowych jest wykorzystanie modeli trójwymiarowych do



planowania i/lub rekonstrukcji fragmentów żuchwy. Zabieg ten cechuje się znaczną złożonością m.in. z powodu skomplikowanego kształtu anatomicznego żuchwy, kości wyjątkowej, bowiem jedynej pracującej w sposób sprzężony w dwóch stawach. Przy operacjach rekonstrukcyjnych niezwykle ważnym aspektem są rezultaty estetyczne, zwłaszcza w przypadku twarzoczaszki. Obecność wszelkich defektów w zakresie zespołu kostno-miękkotkankowego twarzy łatwo przyciąga uwagę otoczenia. W rekonstrukcji żuchwy wykorzystuje się szeroko technologię stereolitografii, doginane wszczepy tytanowe, kość autogenną strzałki oraz biokompatybilne tworzywa sztuczne [26, 27, 28].

W dzisiejszych czasach postęp w kierunku obrazowania przestrzennego struktur anatomicznych, zaawansowane procedury chirurgiczne i wreszcie rozwinięte materiałoznawstwo umożliwiając skuteczną, relatywnie niedrogą i indywidualną rekonstrukcję uszkodzonych elementów szkieletu czaszkowo-twarzowego. Rezultaty kliniczne są satysfakcjonujące. 

Literatura

1. M. Frame, J.S. Huntley: *Rapid prototyping in orthopaedic surgery: A Users Guide*, Scient. World J., 2012:838575, 2012, doi: 10.1100/2012/838575.
2. J. Winder, R. Bibb: *Medical rapid prototyping technologies: State of the art and current limitations for application in oral and maxillofacial surgery*, J. Oral Maxillofac. Surg., 63(7), 2005, 1006-1015.
3. M. Cykowska-Błasiak, P. Ozga: *Wydruk 3D jako narzędzie do planowania zabiegów ortopedycznych*, Budownictwo i Architektura, 2015, 15-23.
4. P. Siemiński, G. Budzik: *Techniki przyrostowe. Druk 3D*. Drukarki 3D, wyd. OPWP, Warszawa, 2015.
5. K.F. Leong, C.M. Cheah, C.K. Chua: *Solid freeform fabrication of three-dimensional scaffolds for engineering replacement tissues and organs*, Biomaterials, 24(10), 2003, 2363-2378.
6. R. Anitha, S. Arunachalam, P. Radhakrishnan: *Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modeling*, J. Mater. Process. Technol., 118(1-3), 2001, 385-388.
7. M. Kozakiewicz, M. Elgalal, P. Loba, A. Broniarczyk-Loba, L. Stefańczyk: *Treatment with individual orbital wall implants in humans – 1-year ophthalmologic evaluation*, J. Craniomaxillofac. Surg., 39, 2011, 30-36.
8. F. Baino: *Biomaterials and implants for orbital floor repair*, Acta Biomater., 7, 2011, 3248-3266.
9. E. Jazwiecka-Kościelniak, M. Kozakiewicz: *A new modification of the individually designed polymer implant visible in X-ray for orbital reconstruction*, J. Craniomaxillofac. Surg., 42, 2014, 1520-1529.
10. E. 3rd Ellis, Y. Tan: *Assessment of internal orbital reconstructions for pure blowout fractures: cranial bone grafts versus titanium mesh*, J. Oral Maxillofac. Surg., 61, 2003, 442-453.
11. M. Kozakiewicz, M. Elgalal, B. Walkowiak, L. Stefańczyk: *Technical concept of patient specific ultrahigh molecular weight polyethylene, orbital wall implant*, J. Craniomaxillofac. Surg., 41, 2013, 282-290.
12. M. Kozakiewicz: *Computer-Aided orbital wall defects treatment by individual design ultrahigh molecular weight polyethylene implants*, J. Craniomaxillofac. Surg., 42(4), 2014, 283-289.
13. T. King-Petersen, M. Rydmark: *Modeling and modification of material 3D objects. The benefit of using a haptic modeling tool*, Stud. Health Technol. Inform., 70, 2000, 162-167.
14. D.M. Greig: *Hypertelorism. A hitherto undifferentiated congenital cranio-facial deformity*, Edinburgh Med. J., 31, 1924, 560-593.
15. M.M. Jr Cohen, R.J. Lemire: *Syndromes with cephalocele*, Teratology, 25, 1982, 161-172.
16. M.M. Jr Cohen, H.O. Sedano, R.J. Gorlin, J.E. Jirásek: *Frontonasal dysplasia (median cleft face syndrome): comments on etiology and pathogenesis*, Birth Defects, 7, 1971, 117-119.
17. A. Moreira Gonzalez, M. Elahi, K. Barakat, R. Yavuzer, B. Brinkmann, I.T. Jackson: *Hypertelorism: the importance of three-dimensional imaging and trends in the surgical correction by facial bipartition*, Plast. Reconstr. Surg., 115(6), 2005, 1537-1546.
18. P. Tessier, G. Guiot, J. Rougerie, J.P. Delbet, J. Pastoriza: *Cranio-naso-orbito-facial osteotomies. Hypertelorism*, Ann. Chir. Plast., 12(2), 1967, 103-118.
19. A. Cohen, A. Laviv, P. Berman, R. Nashef, J. Abu-Tair: *Mandibular reconstruction using stereolithographic 3-dimensional printing modeling technology*, Oral Surg. Oral Med. Oral Pathol. Oral Radiol. Endod., 108(5), 2009, 661-666.
20. H.M. Hidalgo, G.W. Romo, R.T. Estolano: *Stereolithography: a method for planning the surgical correction of the hypertelorism*, J. Craniofac. Surg., 20(5), 2009, 1473-1477.
21. K. Xie, S. Yang, Y.M. Zhu: *3D visualization and simulation in surgical planning system of orbital hypertelorism*, J. Med. Syst., 35(4), 2011, 617-623.
22. M. Azuma, T. Yanagawa, N. Ishibashi-Kanno, F. Uchida, T. Ito, K. Yamagata, S. Hasegawa, K. Sasaki, K. Adachi, K. Tabuchi, M. Sekido, H. Bukawa: *Mandibular reconstruction using prebent to fit rapid prototyping 3-dimensional printing models ameliorates contour deformity*, Head Face Med., 10:45, 2014, doi: 10.1186/1746-160X-10-45.
23. A. Abou-Elfetouh, A. Barakat, K. Abdel-Ghany: *Computer-guided rapid-prototyped templates for segmental mandibular osteotomies: a preliminary report*, Int. J. Med. Robot. 7(2), 2011, 187-192.
24. L. Pao-Hsin, V.W. Tong-Yui, F. Jing-Jing, C. Ken-Chun, H. Jenn-Ren, H. Jehn-Shyun: *3D stereolithographic modeling technique for hemimandibular reconstruction report of a case with innovation technique*, Open J. Dent. Oral Med., 2(1), 2014, 9-13.
25. H. Essig, M. Rana, H. Kokemueller, C. von See, M. Ruecker, F. Tavassol, N.C. Gellrich: *Pre-operative planning for mandibular reconstruction – A full digital planning workflow resulting in a patient specific reconstruction*, Head Neck Oncol., 3:45, 2011, doi: 10.1186/1758-3284-3-45.
26. B.T. Kernan, J.A. 3rd. Wimsatt: *Use of stereolithography model for accurate, preoperative adaptation of a reconstruction plate*, J. Oral Maxillofac. Surg., 58(3), 2000, 349-351.
27. L.L. Jr Cunningham, M.J. Madsen, G. Peterson: *Stereolithographic modeling technology applied to tumor resection*, J. Oral Maxillofac. Surg., 63(6), 2005, 873-878.
28. M.I. Salgueiro, M.R. Stevens: *Experience with the use of prebent plates for the reconstruction of mandibular defects*, Craniomaxillofac. Trauma Reconstr., 3(4), 2010, 201-208.
29. J. Li, Y. Hsu, E. Luo, A. Khadka, J. Hu: *Computer-aided desing and manufacturing and rapid prototyped nanoscale hydroxyapatite/polyamide (n-HA/PA) construction for condylar defect caused by mandibular angle osteotomy*, Aesthetic Plast. Surg., 35(4), 2011, 636-640.
30. H. Yamada, K. Nakaoka, T. Horiuchi, K. Kumagai, T. Ikawa, Y. Shigeta, E. Imamura, M. Iino, T. Ogawa, Y. Hamada: *Mandibular reconstruction using custom-made titanium mesh tray and particulate cancellous bone and marrow harvested from bilateral posterior ilia*, J. Plast. Surg. Hand Surg., 48(3), 2014, 183-190.
31. K. Thankappan, N.P. Trivedi, P. Subash, S.K. Pullara, S. Peter, M.A. Kuriakose, S. Iyer: *Three-dimensional computed tomography-based contouring of a free fibula bone graft for mandibular reconstruction*, J. Oral Maxillofac. Surg., 66(10), 2008, 2185-2192.
32. Y.F. Liu, L.W. Xu, H.Y. Zhu, S.S. Liu: *Technical procedures for template-guided surgery for mandibular reconstruction based on digital design and manufacturing*, Biomed. Eng. OnLine., 13:63, 2014, doi: 10.1186/1475-925X-13-63.
33. J. Hoffmann, C.P. Cornelius, M. Groten, L. Probst, C. Pfannenberger, N. Schwenzer: *Orbital reconstruction with individually copy-milled ceramic implants*, Plast. Reconstr. Surg., 101, 1998, 604-612.
34. M. Elgalal, M. Kozakiewicz, P. Loba, B. Walkowiak, M. Olszycki, L. Stefańczyk: *Patient specific implants, designed using Rapid Prototyping and diagnostic imaging, for the repair of orbital fractures*, Med. Sci. Monit., 16, 2010, 75-79.
35. R. Schön, M.C. Metzger, C. Zizelmann, N. Weyer, R. Schmelzen: *Individually preformed titanium mesh implants for true-to-original repair of orbital fractures*, Int. J. Oral Maxillofac. Surg., 35, 2006, 990-995.