

METODYKA PRODUKCJI POMOCY PRZEDOPERACYJNYCH Z WYKORZYSTANIEM TECHNIK SZYBKIEGO WYTWARZANIA

Magdalena ŻUKOWSKA, Filip GÓRSKI

Streszczenie: Postępujący rozwój technik szybkiego prototypowania i wytwarzania, wpłynął znacząco na obniżenie kosztów produkcji małoseryjnej i jednostkowej, przy równoczesnym podniesieniu jakości i złożoności otrzymywanych produktów. Szczególnie dużą rolę odgrywa zastosowanie technik przyrostowych w medycynie, gdzie podejście indywidualne do pacjenta jest pożądane. W artykule przedstawiono zagadnienie szybkiego wytwarzania w konkretnych obszarach medycyny oraz szczegółowo nakreślono proces wytwórczy modelu anatomicznego służącego jako pomoc przedoperacyjna.

Słowa kluczowe: szybkie wytwarzanie, inżynieria biomedyczna, komunikacja inżynier-lekarz

1. Wprowadzenie

Medycyna, ze względu na swoją specyfikę, należy do grupy obszarów, w których coraz częściej stawia się na wysoką indywidualizację wytwarzanych produktów, szczególnie implantów oraz pomocy przedoperacyjnych. Tematyka wspomagania przedoperacyjnego jest stosunkowo nowa, ze względu na brak odpowiednich narzędzi do wytwarzania modeli pomocniczych. Dotychczas pomoc ta dotyczyła głównie diagnostyki oraz analizy obrazowania medycznego [1]. Skomplikowana budowa narządów oraz różnorodność anatomiczna człowieka sprawiają, że produkcja poszczególnych modeli anatomicznych, służących do zaplanowania zabiegu, nie mieści się nawet w kategorii produkcji małoseryjnej, a jedynie jednostkowej. Niemniej jednak, zapotrzebowanie na modele istnieje i staje się coraz częściej podstawą w przygotowaniu lekarza/lekarza rezydenta oraz studenta (aspekt edukacyjny) [2, 3, 4]. W związku z tym, pojawia się konieczność tworzenia i realizowania projektów, mających na celu ułatwienie wytwarzania pomocy przedoperacyjnych, przy zachowaniu możliwie jak najwyższej dokładności odwzorowania rzeczywistości. Wymagania te wiążą się z jednostką, której produkcja dotyczy, tj. zdrowie i bezpieczeństwo pacjenta [3, 4]. Odpowiedzią na owe zapotrzebowanie jest szybkie prototypowanie i wytwarzanie (*Rapid prototyping and manufacturing*), które dzięki warstwowemu (tj. przyrostowemu) budowaniu modeli, pozwala uzyskać wysoce skomplikowane kształty, niemożliwe do otrzymania przy zastosowaniu klasycznych metod wytwarzania ubytkowego. Ponadto wprowadzenie technik przyrostowych umożliwia zredukowanie czasu procesu wytwórczego i znaczne obniżenie kosztów [5]. Jest to jednak obszar poddany ciągłym badaniom, silnie uzależniony od zainteresowania użytkowników i odbiorców [6]. Obecnie modele wykonywane są w formie standardowego zlecenia do firm bądź instytucji specjalizujących się w wytwarzaniu przyrostowym. Przenosi się to z kolei na brak firm specjalizujących się konkretnie i wyłącznie w wytwarzaniu pomocy przedoperacyjnych. Wiąże się to przede wszystkim z nietypowym charakterem zamówień, wymagającym wiedzy z zakresu zarówno inżynierii jak i medycyny, a także wciąż małą popularnością stosowania modeli anatomicznych w szpitalach. Przekłada się to zatem na

konieczność wprowadzenia rozbudowanego kanału konsultacyjnego na linii inżynier i lekarz. Może to jednak prowadzić do spowolnienia wytworzenia modelu. Niemniej stanowi istotny element procesu produkcyjnego, niemożliwy do pominięcia. Dlatego rozwój szybkiego wytwarzania w medycynie oraz produkcja modeli anatomicznych przekładają się bezpośrednio na rozwój stosunkowo nowej dziedziny jaką jest inżynieria biomedyczna.

Celem artykułu jest zatem przedstawienie zagadnienia szybkiego wytwarzania w przygotowaniu przedoperacyjnym z uwzględnieniem przebiegu całego procesu, od zdjęć diagnostycznych po zindywidualizowany model anatomiczny, umożliwiający przygotowanie i zaplanowanie zabiegu oraz wykonanie operacji symulowanej. Zaproponowana metodyka produkcji tego typu wyposażenia, oparta o metody przyrostowe, ma za zadanie przyspieszyć produkcję i umożliwić jej wdrożenie w codziennej pracy lekarzy.

2. Szybkie wytwarzanie w medycynie

Techniki wytwarzania przyrostowego (ang. *Additive Manufacturing Technologies*) bazując na zapisie cyfrowym geometrii modelu, umożliwiają wykonanie przestrzennych i fizycznych prototypów oraz produktów. Zasadniczo w technologii wyróżnia się trzy podstawowe grupy: szybkie wytwarzanie prototypów i modeli inaczej szybkie prototypowanie (ang. *Rapid Prototyping*), szybkie wytwarzanie narzędzi (ang. *Rapid Tooling*) oraz szybkie wytwarzanie części lub produktów (ang. *Rapid Manufacturing*). Szczególnie ostatnia kategoria łączona jest dodatkowo z technikami wytwarzania ubytkowego. Zastosowanie technik wytwarzania przyrostowego pozwala skrócić czas potrzebny do uzyskania gotowego produktu oraz zmniejszyć koszty generowane przez cały proces, co najbardziej zauważalne jest w zestawieniu z procesem wykonawczym przy użyciu form wtryskowych [5].

Poprzez generowanie produktu przyrostowo, nakładając warstwowo kolejne płaskie przekroje modelu, możliwe jest uzyskanie obiektów o znacznie bardziej skomplikowanej budowie i złożoności kształtów niż jest to osiągalne w przypadku technik ubytkowych [7]. Przekłada się to na wykorzystanie właśnie tych technik w wytwarzaniu zindywidualizowanych modeli medycznych służących do planowania przedoperacyjnego oraz w przypadku indywidualizowania implantów lub protez zewnętrznych.

Medycyna coraz częściej i chętniej korzysta z możliwości szybkiego wytwarzania, sięgając do coraz szerszej grupy metod prototypowania. W przypadku modeli anatomicznych, dominujące jest modelowanie uplastycznionym tworzywem sztucznym – FDM (*Fused Deposition Modeling*). Popularność metody wynika z dużego dostępu do urządzeń niskobudżetowych oraz szerokiej gamy materiałów dedykowanych do tej technologii. Ponadto technologia jest ciągle dynamicznie rozwijana, co prowadzi do poprawienia dokładności wytwarzanych modeli przy równoczesnym zachowaniu stosunkowo niskiej ceny i krótkiego procesu wytwórczego. Medycyna sięga po tę technologię między innymi w przypadku modeli poglądowych, których zadaniem jest przedstawienie zależności struktur w modelowanym narzędziu, umożliwiając usprawnienie przygotowania przedoperacyjnego, a zarazem stanowi element edukacyjny dla młodych lekarzy i studentów. Niemniej jednak modele wykonane technologią FDM, gorzej sprawują się w przypadku wykonywania operacji symulowanej bądź wytwarzania skomplikowanej patologii, wymagającej wysokiej dokładności elementów. Dlatego przy wytwarzaniu fantomów, sięga się również do droższych technologii takich jak Stereolitografia – SLA lub PolyJet. Ich największą zaletą jest lepsze odwzorowanie kształtu, wyższa dokładność

wytwarzanych modeli i, co się z tym wiąże, mniejsze wartości grubości warstwy. Modele wytworzone tymi technologiami są znacznie bardziej szczegółowe, dlatego w przypadku wysoce skomplikowanych operacji jak np. rozdzielenie bliźniąt syjamskich, gdzie konieczne jest zamodelowanie nie tylko części układu kostnego, ale także sieci naczyń krwionośnych, sięga się do tych metod. Warto też nadmienić, że ze względu na sposób pracy urządzeń SLA i PolyJet, możliwe jest wykorzystanie żywic oraz innych materiałów o obniżonej twardości. To z kolei przekłada się na zwiększenie możliwości wytworzenia modeli imitujących żywe tkanki miękkie. Dzięki temu produkowane fantomy mogą posłużyć do przeprowadzenia operacji symulowanej, nawet kilkakrotnie, tak jak miało to miejsce w przypadku modelu nerki, zaprezentowanego przez japoński zespół naukowy podczas kongresu European Association of Urology. Niemniej jednak, technologie te są droższe i dużo bardziej czasochłonne w przeciwieństwie do metody FDM. Dlatego decyzja o doborze technologii wiąże się za każdy razem z konkretnym przypadkiem, czasem i kosztami jakimi dysponuje zleceniodawca oraz wymaganiami stawianymi modelowi. Warto jednak zauważyć, że wszystkie te metody pozwalają na uzyskanie modelu transparentnego przy zachowaniu rzeczywistego kształtu organu [2, 3, 8].

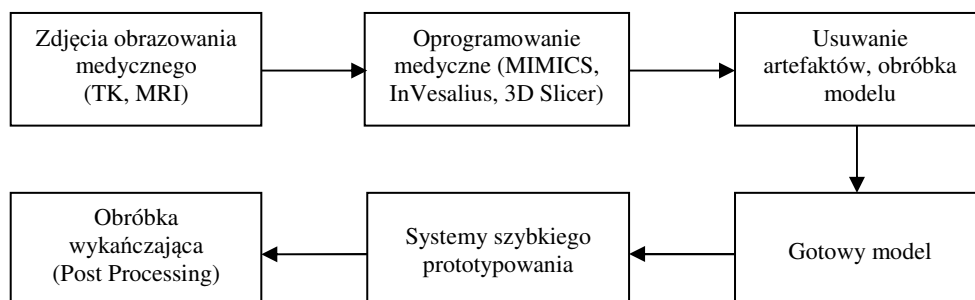
W przypadku implantów i protezoplastyki dominującymi są technologie oparte o selektywne spiekanie laserowe proszków metali – DMLS (*Direct Metal Laser Sintering*), wykorzystujące proszki tytanowe, stosowane również w klasycznej produkcji endoprotez. Ze względu na duże obciążenia występujące w obszarach stosowania endoprotez czy niektórych płytek tytanowych, niemożliwe jest wykorzystanie innych technologii, bazujących na wytwarzaniu z tworzyw sztucznych [9].

3. Metodyka wytwarzania modelu anatomicznego

W artykule przedstawiono konkretne rozwiązanie produkcyjne dla pomocy przedoperacyjnej tj. modelu anatomicznego nerki, o częściowych właściwościach transparentnych, pozwalających na wgląd wewnątrz fantomu, a także o zmniejszonej twardości, imitującej tkankę żywą. Celem jest zaprezentowanie szczegółowej metodyki produkcji z zaproponowaniem możliwych modyfikacji, prowadzących do rozszerzenia funkcjonalności pozyskanego produktu przy równoczesnym zachowaniu stosunkowo niskich kosztów wytwarzania.

Wykonany model nerki składa się z trzech podstawowych elementów: kory nerki (transparentnej i miękkiej), guza (zmiany chorobowej, stanowiącej o konieczności przygotowania modelu anatomicznego) oraz naczyń krwionośnych – żył i tętnic (istotny element określający stopień ingerencji zmiany chorobowej w pozostałe struktury organu, a także decydujący o typie i sposobie przeprowadzanego zabiegu).

Projektowanie metodyki wytwarzania zindywidualizowanego modelu anatomicznego, musi uwzględniać nietypowy charakter obiektu będącego źródłem informacji dla dalszych etapów projektu. Obiekt wejściowy stanowi organizm ludzki, a konkretniej wybrany organ lub grupa narządów i struktur anatomicznych. Ze względu na pracę na istniejącym już fizycznie obiekcie, konieczne jest stosowanie metod inżynierii odwrotnej, dyskretyzacji oraz segmentacji, które doprowadzą do uzyskania przestrzennego obrazu geometrycznego (w postaci siatki trójkątów) [10]. Proces prowadzący do uzyskania modelu anatomicznego przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat metodyki wytwarzania modelu anatomicznego; na podstawie [7]

Zdjęcia obrazowania medycznego, zapisane w międzynarodowym formacie DICOM (*Digital Imaging and Communications in Medicine*) zawierają informację na temat kondycji wybranego narządu lub układu, poddawanego dalszej obróbce. Zdjęcia diagnostyczne są importowane do oprogramowania umożliwiającego segmentację obrazu (np. MIMICS czy bezpłatny program InVesalius). Określając konkretny zakres odcieni szarości dla wybranej tkanki (w tym przypadku tkanki miękkiej), możliwe jest wygenerowanie modelu przestrzennego i jego dalsze eksportowanie do formatu STL (rys. 2). Na tym etapie istotną rolę odgrywa komunikacja pomiędzy lekarzem, a inżynierem. Uzyskany obiekt cyfrowy, niejednokrotnie wymaga konsultacji lekarskiej, celem zatwierdzenia poprawności anatomicznej obiektu i jego relacji z innymi strukturami.



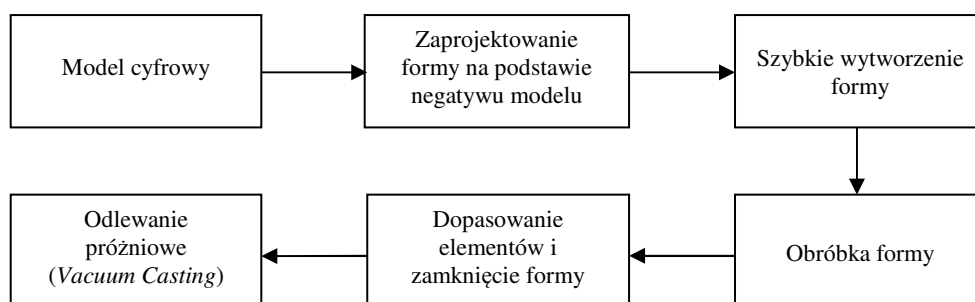
Rys. 2. Widok na zdjęcia tomografii komputerowej i model pozyskany na podstawie segmentacji obrazu (prawy dolny róg)

Uzyskany model cyfrowy poddawany jest dalszym obróbkom, mającymi na celu usunięcie artefaktów (wszelkie dziury, pozostałości tkanek przylegających, pogrubianie ścianek) oraz wygładzeniu, z uwzględnieniem wymagań wynikających ze stosowanej technologii wytwórczej (druk przestrzenny). Na tym etapie najczęściej stosuje się programy CAD z możliwością pracy na siatce trójkątów, np. CATIA czy GOM Inspect. Uzyskany

model cyfrowy przekazywany jest do systemów obsługujących urządzenia szybkiego prototypowania, gdzie jest dzielony na warstwy i zapisywany w postaci komend w formacie G-Code. Zwieńczeniem procesu jest obróbka wykańczająca uzyskanego modelu fizycznego w celu poprawy jego wyglądu oraz pod konkretne wymagania zawarte w zamówieniu [7,10].

Transparentność modelu można uzyskać poprzez dobór odpowiedniej technologii wytwarzania przyrostowego, w zależności od budżetu jakim dysponuje zleceniodawca. W przypadku technologii FDM, dostępne są na rynku materiały przezroczyste, dające znaczną widoczność struktur wewnętrznych. Ich wadą jednak jest wysoka twardość materiału. Alternatywnym wyjściem dla tego rozwiązania jest wykonanie odlewu silikonowego kory nerki, dzięki czemu model wykazuje zarówno właściwości transparentne jak i niską twardość.

Proces odlewania wymaga uprzedniego wytworzenia formy odlewniczej z materiału niewchodzącego w interakcję z materiałem budulcowym modelu (silikon). W związku z tym, w ramach badań, proces wytwórczy modelu został zmodyfikowany według schematu przedstawionego na rysunku 3.



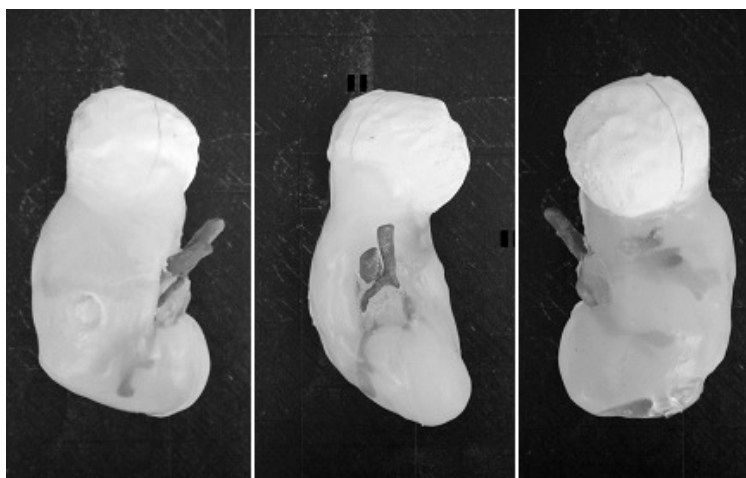
Rys. 3. Metodyka wytwarzania formy drukowanej do odlewania silikonów

Otrzymany w wyniku segmentacji model cyfrowy, następnie obrobiony w programach CAD-owskich, posłużył jako „model matka”, będący podstawą do wytworzenia formy. Podczas projektowania formy, zdecydowano o nadaniu jej kształtu skrzynki z zawartym wewnątrz negatywem modelu jednolitego nerki. Poprzez model jednolity rozumiany jest model cyfrowy zawierający nierozdzielnie wszystkie elementy wymienione w opisie rozdziału 3. Projekt formy wykonano w programie umożliwiającym pracę na siatce trójkątów – Autodesk Meshmixer. W ramach prac wykorzystano operacje prowadzące do pozyskania negatywu (algebra Boole’a) wewnątrz skrzynki, a także dokonano podziału formy na dwie części, umożliwiając swobodne umieszczenie pozostałych elementów składowych przed odlaniem oraz bezproblemowe wyjęcie gotowego modelu fizycznego. Ponadto zaprojektowano układ wlewowy i odpowietrzenie, a także elementy łączenia części formy. Tak zaprojektowaną formę eksportowano do formatu STL i przekazano do oprogramowania obsługującego drukarkę FDM. Otrzymane części wymagały dalszej obróbki, ze względu na istniejący wyraźny efekt schodkowy, wymuszający na zleceniobiorcy dodatkowe wygładzanie negatywu. Przedostatni etap obejmuje umieszczenie wcześniej wytworzonych elementów w sposób stabilny w formie i zamknięcie jej wraz z dokładnym zabezpieczeniem przed napływem powietrza do wewnątrz (rys. 4). Mocowane elementy dopasowane były do negatywu formy, a celem dodatkowego zabezpieczenia przed przemieszczaniem się ich podczas zalewania, zostały

zaklejone przy użyciu masy plastycznej. Odlewanie próżniowe silikonu stanowi zwieńczenie procesu, spajając wszystkie elementy w jeden, funkcjonalny model fizyczny (rys. 5).



Rys. 4. Widok na wykończone części formy z umieszczonymi elementami składowymi modelu



Rys. 5. Widok na gotowy model nerki; od lewej: powierzchnia przednia, przyśrodkowa, tylna

4. Wycena wytworzonych modeli

4.1. Zasadność wyboru szybkiego prototypowania

Wymagania stawiane modelowi oraz możliwości finansowe, determinują bezpośrednio dobór odpowiedniej technologii. Ponadto istotnym czynnikiem, szczególnie w przypadku medycyny odgrywa czas.

Wyjściem do zastosowania technik szybkiego wytwarzania w procesie produkcyjnym modeli anatomicznych było dokładne odtworzenie skomplikowanej budowy narządów i innych struktur. Jednak decyzja wiąże się także ze znacznym zmniejszeniem kosztów wytwórczych oraz szerszą dostępnością drukarek niskobudżetowych, pracujących w technologii FDM i dedykowanych do nich materiałów. Ponadto czas potrzebny do wytworzenia w pełni funkcjonalnego modelu wynosi zaledwie kilka dni (w zależności od obranej technologii i wymagań dotyczących modelu).

4.2. Technologia i materiał

Ze względu na intensywny rozwój branży druku niskobudżetowego, szczególnie technologii FDM, różnorodność materiałów dostępnych pozwala na wybór tworzywa o ściśle określonych parametrach dotyczących twardości, wytrzymałości, elastyczności i koloru, a także rozszerza widełki cenowe, umożliwiając tym samym znaczne obniżenie kosztów materiałowych.

Obrana w badaniach technologia FDM dedykowana była jej dostępnością i łatwością obsługi. Technologia odlewania próżniowego wybrana została na podstawie analizy dostępnych rozwiązań pod względem kosztów i dokładności odtworzenia kształtu kory nerki, przy zachowaniu obniżonej twardości materiału. Ze względu na wysoki poziom odwzorowania powierzchni przez silikon, w połączeniu z jego właściwościami, rozwiązanie to było najbardziej optymalne.

Przy wytworzeniu metodą FDM poszczególnych elementów składowych modelu nerki (guza, żyły i tętnice, forma odlewnicza), zastosowano trzy różne materiały, w zależności od stawianych im wymagań. W związku z próbą odtworzenia rzeczywistej twardości guza, wykorzystano materiał o wysokiej elastyczności (zbliżonej do gumy) – Ninja Flex. Tym samym uzyskano model podatny na ściskanie między palcami. Modele tętnic i żył spełniały funkcję jedynie wizualną, nie były poddawane cięciu podczas operacji symulowanej, w związku z czym nie występowała konieczność wykorzystywania droższych materiałów elastycznych. W przypadku tych elementów zastosowano włókno ABS w kolorach czerwonym i niebieskim (reprezentacja funkcji struktury). Ponadto w przypadku tych elementów konieczne było użycie dodatkowego materiału podporowego o niższych właściwościach względem ABSu, w celu podparcia wydruków, których budowa była na tyle skomplikowana, że niemożliwe było ułożenie ich przylegająco do stołu.

Podczas wytwarzania formy odlewniczej istotne było ominięcie interakcji pomiędzy powierzchnią negatywu, a materiałem budulcowym, dlatego zdecydowano się na zastosowanie tworzywa PLA. Korę nerki, wytworzoną metodą odlewania próżniowego, wykonano z transparentnego silikonu, o twardości 45 Shore A, uzyskując w ten sposób model w znacznym stopniu imitujący żywy organ.

Zbierając informacje dotyczące kosztów materiałów oraz stawki godzinowej dla poszczególnych urządzeń, dokonano podsumowania kosztów dla poszczególnych elementów (tab. 1) oraz wyceny całej usługi z uwzględnieniem projektu formy oraz segmentacją modelu (tab. 2). Praca drukarek pracujących w technologii FDM wynosiła odpowiednio 35 zł/h dla elementów guza, żył i tętnic (Makerbot Replicator 2X) oraz 30 zł/h dla formy (XYZ Printer DaVinci).

Tab. 1 Wycena elementów w oparciu o stosowany materiał i czas wykonania

Element	Mat. Budulcowy [kg]	Mat. Podporowy [kg]	Czas wykonania	Cena [zł] (mat.)	Cena [zł] (mat. + stawka h)
Guz	0,0314	0,0000	3 h 53 min	6,87	142,78
Tętnica	0,0073	0,0077	1 h 7 min	3,24	42,32
Żyła	0,0098	0,0119	1 h 50 min	4,73	68,90
Forma I	0,1318	0,0000	9 h	15,68	285,68
Forma II	0,1225	0,0000	8h 15 min	14,57	262,07
Kora nerki	0,3000	0,0000	12 h wiązanie	20,70	–

Tab 2. Wycena modelu fizycznego z uwzględnieniem poszczególnych aspektów

Wycena	Suma [zł]	Kwota finalna [zł]
Model fizyczny – koszt materiałów	65,79	70,00
Model fizyczny – koszt materiałów + stawka godzinowa za realizację procesu	822,46	825,00
Model fizyczny – koszt materiałów + stawka godzinowa + projektowanie (VC i segmentacja)	1062,46	1065,00

4.3. Czasochłonność procesu

Jak można zauważyć, koszty materiałowe są bardzo niskie w stosunku do wymiarów modelu końcowego, z uwzględnieniem, że jest to produkcja jednostkowa. Główne obciążenie finansowe wynika z czasochłonnego wytworzenia formy odlewniczej, ze względu na kształt skrzynki oraz stosunkowo duże wymiary modelu. To z kolei przełożyło się na zwielokrotnioną stawkę godzinową, generującą tym samym wysokie koszty wytworzenia fantomu.

Czas trwania procesu wytwarzania modelu fizycznego wyniósł 36 h (włącznie z zaprojektowaniem i przygotowaniem formy), natomiast segmentacja modelu cyfrowego wyniosła 2 h. Podsumowując proces wytwórczy modelu trwał 38h. Tak krótki czas wytworzenia w pełni funkcjonalnego modelu stanowiącego pomoc przedoperacyjną stanowi istotny argument w dyskusji dotyczącej stosowania technik szybkiego wytwarzania w produkcji modeli anatomicznych.

5. Podsumowanie

Nietypowe zmiany chorobowe, rozległe zmiany genetyczne czy wysokie ryzyko, generują konieczność wsparcia specjalisty w planowaniu i przygotowaniu przedoperacyjnym. Wytworzenie funkcjonalnych modeli anatomicznych obrazujących zaistniałą sytuację, ułatwiają pracę lekarza i zwiększają bezpieczeństwo pacjenta oraz

powodzenie operacji. Zastosowanie metod przyrostowych pozwala dokładnie odtworzyć kształt narządu, zmiany chorobowej i innych struktur. Nakładanie warstwowe płaskich przekrojów zwiększa możliwości wytworzenia obiektu o wysoce skomplikowanej budowie, niemożliwej do odtworzenia klasycznymi metodami.

Proces wytwórczy oparty o metody szybkiego wytwarzania i prototypowania pozwala znacznie skrócić czas potrzebny na uzyskanie gotowego produktu, co ma duże znaczenie szczególnie w medycynie, gdzie wymagane jest kompleksowe i sprawne przygotowanie lekarza do planowanego zabiegu. Przedstawione w artykule analiza procesu wytwórczego pomocy przedoperacyjnej, podkreśla istotność stosowania technik przyrostowych, biorąc pod uwagę próbę maksymalnego skrócenia czasu wytwarzania. Wiąże się to jednak z umiejętnościami operatora, który oprócz rozeznania w tematyce metod szybkiego wytwarzania i wysokich umiejętności projektowych, musi posiadać wiedzę z zakresu anatomii człowieka i umiejętność pracy ze zdjęciami obrazowania medycznego. Stanowi to podstawę przy produkcji funkcjonalnego modelu medycznego przy zminimalizowanej konieczności konsultacji z lekarzem. Nie można jednak jej wykluczyć, ze względu na specyfikę zawodu oraz rozszerzoną wiedzę z zakresu historii choroby pacjenta. W tym obszarze znaczenie odgrywa zarządzanie wiedzą pozyskaną podczas konsultacji i długofalowej współpracy z personelem medycznym.

Istotnym w procesie wytwarzania modeli anatomicznych jest również zminimalizowanie kosztów, które wpłyną na zwiększenie popularyzacji stosowania fantomów w przygotowaniu przedoperacyjnym i pomogą stworzyć nowy standard w opiece nad pacjentem i wsparciu lekarza w planowaniu zabiegu. Biorąc pod uwagę uzyskane kwoty w badaniu prezentowanym w artykule, konieczne jest rozważenie optymalizacji projektowania formy odlewniczej, tak by skrócić czas jej wyprodukowania, a tym samym zmniejszyć nakłady finansowe przeznaczone na ten etap procesu.

Ze względu na różnorodność anatomiczną człowieka niemożliwe jest stworzenie procesu w pełni powtarzalnego. Produkcja pomocy przedoperacyjnych jest produkcją jednostkową, potrzeby w tym zakresie mają natomiast charakter masowy. W związku z tym metody projektowania i produkcji tego typu wyrobów powinny się opierać o dotychczasowe badania i wdrożenia w zakresie masowej kustomizacji i automatyzacji projektowania, tak by możliwie uprościć proces wytwórczy i znormalizować go na pewnym etapie.

Literatura

1. Joao Manuel R. S. Tavares, Renato Natal Jorge, *Developments in Medical Image Processing and Computational Vision*, 2015
2. Doskocz J., Tokłowicz P., Magdziak-Tokłowicz M., Jakóbczyk A., Doskocz A., Kardasz P., Zastosowanie druku 3D w medycynie, „Ogólnopolski Przegląd Medyczny”, 2016, nr 5/2016, str. 38-44
3. European Association of Urology, Surgeons develop personalised 3D printed kidney to simulate surgery prior to cancer operation [online], [dostęp: lipiec 2017], <<http://www.alphagalileo.org/ViewItem.aspx?ItemId=140891&CultureCode=en>>
4. Lifelike 3D-printed heart to help train surgeons [online], [dostęp: lipiec 2017], <<http://www.bbc.com/news/uk-england-nottinghamshire-29047165>>
5. Pająk E., Dudziak A., Górski F., Wichniarek R., *Techniki przyrostowe i wirtualne w procesach przygotowania produkcji*, Poznań, 2011

6. Silberstein J. L., Maddox M. M., Dorsey P., Feibus A., Thomas R., B. Lee R., Physical Models of Renal Malignancies, Using Standard Cross-sectional Imaging and 3-Dimensional Printers: A Pilot Study, "Urology" 2014, 84 (2), str. 268–273
7. Gonera K., Kurzac J., Rusińska M., Dybała B., Metody CAx w aplikacjach medycznych przy wytwarzaniu technologiami generatywnymi, "Mechanik" 2010, Nr 2 (83), str. 132.
8. 3ders.org, French hospital makes advancements in kidney cancer surgery using multi-colored 3D printed models [online], [dostęp: lipiec 2017], <<http://www.3ders.org/articles/20151019-french-hospital-kidney-cancer-surgery-multi-colored-3d-printed-models.html>>
9. 3ders.org, Swedish teen with neurofibromatosis walks again with 3D printed hip implant [online], [dostęp: lipiec 2017], <<https://www.3ders.org/articles/20161211-swedish-teen-with-neurofibromatosis-walks-again-with-3d-printed-hip-implant.html>>
10. Wyleżoł, Muzalweska M., Metodyka modelowania w inżynierii biomedycznej z użyciem inżynierii rekonstrukcyjnej, "Mechanik" 2015, nr 02

Mgr inż. Magdalena ŻUKOWSKA

Dr inż. Filip GÓRSKI

Katedra Zarządzania i Inżynierii Produkcji

Politechnika Poznańska

60-965 Poznań, Ul. Piotrowo 3

tel.: (061) 665 27 18

(061) 665 27 08

e-mail: magdalena.k.zukowska@doctorate.put.poznan.pl

filip.gorski@put.poznan.pl