

Zastosowanie i właściwości druku 3D – technologii przyszłości w protetyce stomatologicznej

Application and properties of 3D printing technology, the future of prosthodontics

Kamila Wróbel-Bednarz¹, Daniel Surowiecki²

¹ Katedra Protetyki Stomatologicznej, Warszawski Uniwersytet Medyczny

² Studenckie Koło Naukowe przy Katedrze Protetyki Stomatologicznej, Warszawski Uniwersytet Medyczny

Kierownik: prof. dr hab. E. Mierzwińska-Nastalska

HASŁA INDEKSOWE:

druk 3D, techniki addytywne, cyfryzacja

KEY WORDS:

3D printing, additive techniques, digitization

Streszczenie

Wraz z rozwojem techniki, zwiększają się wymagania stawiane odbudowom protetycznym, zarówno w aspekcie efektu terapeutycznego, estetycznego, jak i samego procesu ich wykonawstwa. W ostatnich latach zaadaptowano wiele rozwiązań technologicznych do stomatologii, jak np. technologia CAD-CAM. Głównymi elementami każdego systemu są skaner, oprogramowanie projektowania oraz urządzenie produkujące pożądaną element. Rozwinięciem etapu produkcji, który obejmował technikę ubytkową, polegającą na frezowaniu materiału do pożądanego kształtu jest szeroko rozumiany druk 3D, wyróżniający się na tle wszystkich innych metod kształtowania wyrobów tym, że materiał budulcowy jest nakładany i łączony – model powstaje w wyniku dodawania materiału, utwardzania cieczy lub spiekania proszku.

W obliczu dynamicznego rozwoju tej technologii celowe wydaje się usystematyzowanie dotychczasowej wiedzy o zastosowaniu i właściwościach druku 3D, jako technologii przyszłości w protetyce stomatologicznej i próba zdefiniowania dalszych kierunków badań, które pozwolą na szersze jego zastosowanie w stomatologii.

Summary

As technology improves, requirements for all dental restorations are increasing, both in terms of therapeutic and aesthetic effect, as well as the process of their production. In recent years, a number of technological solutions has been adapted for dentistry, for example popular CAD/CAM technology. The main parts of each system are a scanner, software for designing and producing device. Evolution of production phase, which contained subtractive manufacturing, consisting in milling the material into a desired shape, is 3D printing, which stands out against any other methods of forming products in that the building material is applied and connected – a model is formed by the addition of material, curing the liquid or powder sintering.

In view of dynamic progress of this technology, it seems appropriate to systemize current knowledge about application and properties of 3D printing, as a technology of prosthodontics future and attempt to define needs for further research, which may allow to use 3D printing on a large scale in dentistry.

Many researchers are trying to discover the 3D printing technology, its properties and potential

Wielu badaczy stara się zgłębiać technologię druku 3D, jej przydatność kliniczną i potencjalne zastosowania, których jeszcze nie opracowano na szeroką skalę. W niniejszej pracy na podstawie przeglądu piśmiennictwa przedstawiono możliwe zastosowania druku 3D w stomatologii, a zwłaszcza protetyce stomatologicznej, ocenę właściwości uzyskanych wyrobów, zalety tej techniki, oraz jej wady i kierunek dalszych badań.

In this paper, basing on the review of literature, the possible applications of 3D printing in dentistry, particularly in prosthodontics, assessment of the properties of specific products, the advantages, drawbacks and direction for further studies have been shown.

Wprowadzenie

Wraz z rozwojem techniki, zwiększają się wymagania stawiane odbudowom protetycznym, zarówno w aspekcie efektu terapeutycznego, estetycznego, jak i samego procesu ich wykonawstwa. W tym obszarze w ostatnich latach zaadaptowano wiele rozwiązań technologicznych do stomatologii, jak popularna technologia CAD/CAM (Computer Aided Design – Computer Aided Manufacturing), która od wielu już lat służy do projektowania kształtu i zasięgu konstrukcji protetycznych, a następnie ich produkcji w urządzeniu sterowanym komputerem wyposażonym w odpowiednie oprogramowanie informatyczne.¹ Głównymi elementami każdego systemu są: skaner – urządzenie, które rejestruje geometrię i przetwarza ją na dane cyfrowe, oprogramowanie do komputerowo wspomaganego projektowania CAD oraz urządzenie produkujące pożądaną element.² Obecnie wykorzystywane są dwa rodzaje skanerów: bezdotykowy i dotykowy.³ Ten pierwszy, nazywany także optycznym, wykorzystuje białe światło lub wiązkę lasera, które odbite od powierzchni są rejestrowane, a następnie przetwarzane na dane cyfrowe. Drugi, rzadziej stosowany ze względu na bardziej skomplikowaną procedurę i koszt urządzenia to skaner mechaniczny, którego użycie polega na dotykaniu rejestrowanych powierzchni

specjalną końcówką, która rejestruje wielkość i kształt badanej struktury. Uzyskane dane zostają skonwertowane do formatu STL (StereoLithography), w którym zostaje zaprojektowana żądana konstrukcja protetyczna.² Samo projektowanie jest w dużym stopniu zautomatyzowane, co czyni je szybkim i prostym. Jednocześnie dane cyfrowe stanowią formę dokumentacji medycznej. Dzięki takiej formie zapisu danych, możliwa jest całkowicie powtarzalna produkcja, co według niektórych autorów stanowi największą zaletę tej technologii.⁴

W obróbce materiałów wyróżnia się dwie podstawowe metody uzyskania pożądanego kształtu: ubytkową, czyli subtrakcyjną, w której materiał zostaje usuwany z większej części oraz addytywną, która polega na dokładaniu kolejnych porcji. Rozwinięciem etapu produkcji, który obejmował technikę polegającą na frezowaniu materiału do pożądanego kształtu jest szeroko rozumiany druk 3D, wyróżniający się na tle innych metod kształtowania wyrobów tym, że materiał budulcowy jest nakładany i łączony – model powstaje w wyniku dodawania materiału, utwardzania cieczy lub spiekania proszku, gdzie warstwa po warstwie powstaje przestrzenny obiekt.⁵ Wśród znanych metod przyrostowych, zastosowanie w stomatologii znalazły takie, jak: SLS (selektywne spiekanie laserowe proszków),

SLM (selektywne topienie metali), FDM (modelowanie ciekłym tworzywem termoplastycznym), Jet Modeling (modelowanie strumieniowe), DLP (utwardzanie żywic światłem UV rzucanym z cyfrowych przetworników).^{5,6}

W obliczu dynamicznego rozwoju technologii druku 3D celowe wydaje się usystematyzowanie dotychczasowej wiedzy o jego zastosowaniu i właściwościach, jako technologii przyszłości w protetyce stomatologicznej i próba zdefiniowania dalszych kierunków badań, które pozwolą na szersze jego zastosowanie w stomatologii.

W niniejszej pracy przedstawiono możliwe zastosowania druku 3D w stomatologii, a zwłaszcza protetyce stomatologicznej, ocenę właściwości uzyskanych wyrobów, zalety i wady technologii, oraz kierunek dalszych badań.

Zastosowanie druku 3D

Technologia SLS (Selective Laser Sintering) została opatentowana w 1989 roku na University of Texas, polega ona na selektywnym spiekaniu proszków przy użyciu komputerowo sterowanego lasera. Materiałami użytymi w tej technologii mogą być proszki metali, kompozyty termoplastyczne, woski i materiały ceramiczne.^{3,5} Dzięki wykorzystaniu technologii SLS, możliwe jest wykonywanie konstrukcji protetycznych z wykorzystaniem stopu metali, czego przykładem może być wkład koronowo-korzeniowy, ale także podbudowy uzupełnień stałych, jak korony, czy mosty.^{7,8} Również w implantologii zastosowano tak wytworzony materiał – implant żyłkowy u pacjenta z atrofią żuchwy.⁹ Jak podają Lima i wsp. w swojej pracy przeglądowej, SLS może służyć do wykonania protez ruchomych, szczególnie do wytworzenia częściowych protez osiadających, ale także podbudowy protezy szkieletowej, co potwierdzają badania Bibba i wsp.^{10,11} Warta odnotowania jest praca Chena i wsp., którzy zaproponowali metodę pełnej automatyzacji

wykonawstwa częściowej protezy ruchomej w celu uzyskania lepszego obciążenia podłoża i redukcji nierównomiernego zaniku wyrostka zębodołowego szczęki i części zębodołowej żuchwy. Autorzy podkreślają możliwość dokładniejszego, w stosunku do konwencjonalnych metod, zaprojektowania płyty protezy, uwzględniając bardzo precyzyjnie miejsca odciążenia. Wyniki badań wskazują, że jest to właściwa metoda postępowania, pozwalająca uzyskać lepsze rezultaty rehabilitacyjne, obniżyć ryzyko błędu podczas wykonywania protezy metodą konwencjonalną, a także skrócić czas potrzebny do ich wykonania.¹² Ponadto, Hems i wsp. uważają, że do tego typu konstrukcji protetycznych technologia druku 3D jest bardziej wskazana niż technologia CAD/CAM, ze względu na oszczędność materiału, charakterystyczną dla metod addytywnych a także nieograniczone możliwości produkcji, które w tej drugiej technologii zależą od wielkości końcówki pracującej i zakresu jej ruchów.¹³ Badania *in vitro* potwierdziły odpowiednie właściwości mechaniczne prac protetycznych uzyskanych w technologii SLS zarówno w porównaniu do uzupełnień uzyskanych metodą odlewu, jak i w technologii CAD/CAM (ryc. 1, 2, 3).^{7,14}

Kolejną technologią, która ma swoje zastosowanie w stomatologii jest FDM (Fused Deposition Modeling), polegająca na warstwowym budowaniu modelu z polimeru, wytłaczanego z grzanej dyszy, w której to materiał zostaje częściowo roztopiony, a ruch głowicy sterowanej komputerowo pozwala na odkładanie materiału warstwa po warstwie z dużą precyzją.^{5,10} W tej technologii, dzięki szerokiej gamie materiałów termoplastycznych, możliwe jest nie tylko wyprodukowanie finalnej pracy, ale również elementów wykorzystywanych w innych etapach ich wykonawstwa, jak indywidualna łyżka wyciskowa, czy szablon chirurgiczny. Tego typu konstrukcja charakteryzuje



Ryc. 1. Drukarka 3D SLM.



Ryc. 2. Podbudowa mostu wydrukowana z wykorzystaniem techniki SLS.



Ryc. 3. Proteza szkieletowa wydrukowana z wykorzystaniem techniki SLM.



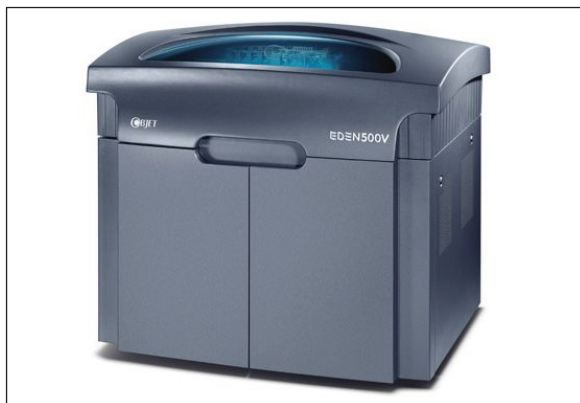
Ryc. 4. Drukarka 3D FDM.



Ryc. 5. Diagnostyczny model czaszki wydrukowany z wykorzystaniem techniki FDM.

się większą precyzją przylegania i możliwością zaprojektowania wymiarów z uwzględnieniem odpowiedniej ilości masy wyciskowej. Ponadto nowatorską metodą w przytoczonej pracy było wykorzystanie łyżki wyciskowej wykonanej z PLA, materiału uzyskiwanego z kukurydzy, który należy do materiałów biokompatybilnych i odnawialnych (ryc. 4, 5).¹⁵

Technologią, która zdaje się mieć najszersze zastosowanie w stomatologii jest Jetting Modeling (JM), polegająca na natryskiwaniu ciekłego polimeru z głowicy drukującej, a następnie jego utwardzaniu przy użyciu lampy UV – stanowi to różnicę w stosunku do wyżej omówionej technologii FDM.⁵ Ponadto,



Ryc. 6. Drukarka 3D PolyJet.



Ryc. 7. Proteza całkowita wydrukowana z wykorzystaniem techniki PolyJet.



Ryc. 8. Biokompatybilny implant kości czaszki.

badanie porównujące dokładność odwzorowania wirtualnego modelu przez różnego typu drukarki 3D wykazało, że technologia JM charakteryzuje się lepszymi właściwościami.¹⁶ To właśnie w tej technologii producenci oferują najwięcej materiałów stosowanych w stomatologii, jak VeroGlaze (Stratasys, Stany Zjednoczone), który służyć może do produkcji koron, mostów, wkładów koronowych, diagnostycznych wax-up i próbnych licówek.¹⁷ Jak wykazały badania *Ishidy* i *Miyasaki*¹⁸ porównujące dokładność wymiarów koron wykonanych z żywicy, technologia ta zachowuje w bardzo

dobrym stopniu dokładność wytwarzania, a ewentualne różnice w wymiarze są akceptowalne klinicznie. Podobnie, badania *Parka* i wsp.¹⁹ wykazały zarówno dobre odwzorowanie wymiarów, jak i zadowalającą szczelność brzożną, która jest bardzo ważnym aspektem klinicznym. Kolejnym przykładem zastosowania klinicznego technologii JM jest wykonanie modelu zastępującego klasyczny model gipsowy, który charakteryzuje się dokładnym odwzorowaniem i możliwością szybkiej powtarzalnej produkcji, niemożliwej do uzyskania metodą konwencjonalną, a niezwykle przydatną w przypadku uszkodzenia modelu (ryc. 6, 7).^{20, 21}

Bardzo ważnym elementem rehabilitacji narządu żucia jest odbudowa kostna i również w tym obszarze druk 3D pozwala na istotne udoskonalenie procedur, czego przykładem może być precyzyjnie zaprojektowany element zbudowany z fosforanu magnezu, lub pirofosforanu wapnia, które uzyskały doskonałe wyniki cytokompatybilności i własności mechanicznych.^{22,23,24}

Podsumowanie

Cyfrizacja znajdująca zastosowanie w stomatologii jest niewątpliwie ogromnym skokiem jakościowym w pracy lekarza dentystry. Dane cyfrowe uzyskane przy pomocy

skanerów wewnątrzustnych, a także zdjęcia tomografii stożkowej, umożliwiają lepszą komunikację między lekarzem a technikiem oraz między specjalistami różnych dziedzin. Dzięki nim możliwe jest stworzenie „wirtualnego pacjenta”, natomiast proces projektowania, w całości przeprowadzany w komputerze staje się szybszy i bardziej precyzyjny.²⁵ Drukowanie 3D jest dowodem na unowocześnienie stomatologii, umożliwiając produkcję tak samo a nawet bardziej dokładną jak metodami konwencjonalnymi, zapewniającą doskonałe dopasowanie, zajmującą mniej czasu, oszczędzającą materiał w porównaniu do frezowania typowego dla systemów CAD/CAM oraz charakteryzującą się ogromną paletą stosowanych materiałów zarówno sprawdzonych przez lata praktyki klinicznej, jak i innowacyjnych.²⁶ Ponadto, niektórzy autorzy, uważają, że technologia druku 3D jest kolejnym krokiem, pozwalającym pozbyć się wad dotychczasowych systemów CAD/CAM związanych ze specyfiką pracy frezarki.²⁷ Technologia druku 3D może być pomocna w pracy stomatologa nie tylko przy produkcji elementów odbudowy protetycznej czy materiałów kościozastępczych, ale także w wielu innych zastosowaniach, jak „drukowanie” indywidualnie zaprojektowanych opatrunków z nanocelulozy, stosowanych po zabiegach chirurgicznych w obrębie jamy ustnej, modeli do nauki anatomii dla studentów.^{28,29} Może dotyczyć to także wielu innych dziedzin medycyny, jak produkcja nowych postaci leków i ich nośników w terapiach celowanych, czy będąca niegdyś jedynie w sferze wyobraźni, produkcja całych tkanek i narządów, polegająca na nakładaniu warstw „wydrukowanych” komórek, a następnie połączeniu ich specjalną żelową substancją. Według autorów prac z dziedziny biotechnologii metoda ta, uwzględniając zaprojektowanie waskularyzacji tkanki i jej immunozgodność, może być główną drogą rozwoju transplantologii i chirurgii.^{30,31}

Jak każda nowa technologia, druk 3D wymaga dalszych badań, zwłaszcza klinicznych, czego potrzebę podkreślają autorzy eksperymentów przeprowadzonych *in vitro*. Czynnikiem istotnie ograniczającym jej szeroką dostępność jest ciągle wysoki koszt urządzeń. Pomimo relatywnie krótkiego okresu istnienia technologii druku 3D, ale jednocześnie jej dynamicznego rozwoju, można zauważyć trend poprawy istniejących problemów, szczególnie związanych z precyzją wydruku, przez co niezwykle ważne jest ostrożne wprowadzanie poszczególnych urządzeń do codziennej praktyki. W piśmiennictwie odnaleźć można starsze prace, których wyniki pokazują wady technik addytywnych, jednak najnowsze doniesienia wielu autorów pozwalają z optymizmem oczekiwać na dalszy ich rozwój (ryc. 8).^{28,31}

Zdjęcia zamieszczono za zgodą firmy BIBUS MENOS Sp. z o.o.

Piśmiennictwo

1. *Majewski S*: Nowe technologie wytwarzania stałych uzupełnień zębowych: galwanofoming, technologia CAD/CAM, obróbka tytanu i współczesne systemy ceramiczne. *Protet Stomatol* 2007; LVII, 2: 124-131.
2. *Shenoy VK, Prabhu BM*: Computer-aided design/computer-aided manufacturing in dentistry – Future is present. *J Interdiscip Dentistry* 2015; 5: 60-64.
3. *Azari A, Nikzad S*: The evolution of rapid prototyping in dentistry: a review. *Rapid Protot J* 2009; 15, 3: 216-225.
4. *Biesaga R, Biesaga Ł*: Wykorzystanie komputerowych systemów CAD/CAM do projektowania i wykonania stałych uzupełnień protetycznych. *e-Dentico* 2011; 29: 14-26.
5. *Siemiński P, Budzik G*: Techniki przyrostowe.

- Druk 3D. Drukarki 3D. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2015.
6. *Nowicki A, Jagucka-Mętel W, Sobolewska E*: Drukarki 3D – możliwości zastosowania w praktyce stomatologicznej. *Mag Stomatol* 2015; 11: 74-77.
 7. *Wróbel-Bednarz K, Walke W, Basiaga M*: Cechy mechaniczne układu zęb–cement–wkład koronowo-korzeniowy wykonany ze stopu Co-Cr metodą selektywnego spiekania laserowego. *Protet Stomatol* 2014; LXIV, 5: 317-328.
 8. *Borsuk-Nastaj B, Młynarski M*: Zastosowanie technologii selektywnego topienia laserem (SLM) w wykonawstwie stałych uzupełnień protetycznych. *Protet Stomatol* 2012; LXII, 3: 203-210.
 9. *Mangano F, Bazzoli M, Tettamanti L, Farronato D, Maineri M, Macchi A, Mangano C*: Custom-made, selective laser sintering (SLS) blade implants as a non-conventional solution for the prosthetic rehabilitation of extremely atrophied posterior mandible. *Lasers Med Sci* 2013; 28: 1241-1247.
 10. *Lima JMC, Anami LC, Araujo RM, Pavanelli C*: Removable Partial Dentures: Use of Rapid Prototyping. *J Prosthodont* 2014; April: 1-4.
 11. *Bibb R, Eggbbber D, Williams R*: Rapid manufacture of removable partial denture frameworks. *Rapid Protot J* 2006; 12: 95-99.
 12. *Chen J, Ahmad R, Suenaga H, Li W, Sasaki K, Swain M, Li Q*: Shape Optimization for Additive Manufacturing of Removable Partial Dentures – A New Paradigm for Prosthetic CAD/CAM. *PLoS ONE* 2015; 7: 10.
 13. *Hems E, Knott N*: 3D printing in prosthodontics. *FDJ* 2014; 5: Issue 4.
 14. *Choi YJ, Koak JY, Heo SJ, Kim SK, Ahn JS, Park DS*: Comparison of the mechanical properties and microstructures of fractured surface for Co-Cr alloy fabricated by conventional cast, 3-D printing laser-sintered and CAD/CAM milled techniques. *J Korean Acad Prosthodont* 2014; 52, 2: 67-73.
 15. *Chen H, Yang X, Chen L, Wang Y, Sun Y*: Application of FDM three -dimensional printing technology in the digital manufacture of custom edentulous mandible trays. *Sci Rep* 2016; 6: 19207.
 16. *Murugesan K, Anandapandian PA, Sharma SK, Vasantha-Kumar M*: Comparative Evaluation of Dimension and Surface Detail Accuracy of Models Produced by Three Different Rapid Prototype Techniques. *J Indian Prosthodont Soc* 2012; 1, 12: 16-20.
 17. Superior 3D Printing of Dental Models. *Product News, Br Dent J* 2014; 216: 261.
 18. *Ishida Y, Miyasaka T*: Dimensional accuracy of dental casting patterns created by 3D printers. *Dent Mater J* 2016; 35, 2: 250-256.
 19. *Park JY, Kim HY, Kim JH, Kim JH, Kim WC*: Comparison of prosthetic models produced by traditional and additive manufacturing methods. *J Adv Prosthodont* 2015; 7: 294-302.
 20. *Raghavan R, Kumar R, Geethprasad TS*: 3-D Printing – An Innovation Driving Prosthodontics To Future. *Guident* 2016; Jan: 28-30.
 21. *Kasparova M, Grafova L, Dvorak P, Dostalova T, Prochazka A, Eliasova H, Prusa J, Kakawand S*: Possibility of reconstruction of dental plaster cast from 3D digital study models. *Biomed Eng Online* 2013; 12: 49.
 22. *Yun PY*: The application of three-dimensional printing techniques in the field of oral and maxillofacial surgery. *J Korean Assoc Oral Maxillofac Surg* 2015; 41: 169-170.
 23. *Klammert U, Vorndran E, Reuther T, Muller FA, Zorn K, Gbureck U*: Low temperature fabrication of magnesium phosphate cement scaffolds by 3D powder printing. *J Mater Sci: Mater Med* 2010; 21: 2947=2953.
 24. *Gbureck U, Holzel T, Biermann I, Barralet JE, Grover LM*: Preparation of tricalcium phosphate/calcium pyrophosphate structures via rapid prototyping. *J Mater Sci: Mater Med* 2008; 19: 1559-1563.
 25. *Culp E*: Digital Dentistry: A New Era of

- Patient Care. *Compend Contin Educ Dent* 2013; 34: 782-783.
26. *Chen H, Wang H, Lv P, Wang Y, Sun Y*: Quantitative Evaluation of Tissue Surface Adaption of CAD-Designed and 3D Printed Wax Pattern of Maxillary Complete Denture. *Biomed Res Int* 2015; Article ID 453968, 5 pages.
27. *Ebert J, Özkol E, Zeichner A, Uibel K, Weiss Ö, Koops U, Telle R, Fischer H*: Direct Inkjet Printing of Dental Prostheses Made of Zirconia. *J Dent Res* 2009; 88, 7: 673-676.
28. *Rees A, Powell LC, Chinga-Carrasco G, Gethin DT, Syverud K, Hill KE, Thomas DW*: 3D Bioprinting of Carboxymethylated-Periodate Oxidized Nanocellulose Constructs for Wound Dressing Applications. *Biomed Res Int* 2015; Article ID 925757, 7 pages.
29. *Torres K, Staśkiewicz G, Śnieżyński M, Drop A, Maciejewski R*: Application of rapid prototyping techniques for modelling of anatomical structures in medical training and education. *Folia Morphol* 2011; 70: 1-4.
30. *Chia H, Wu B*: Recent advances in 3D printing of biomaterials. *J Biol Eng* 2015; 9: 4.
31. *Mironov V, Boland T, Trusk T, Forgacs G, Markwald RR*: Organ printing: computer-aided jet-based 3D tissue engineering. *Trends Biotechnol* 2003; 21: 157-161.

Zaakceptowano do druku: 28.11.2016 r.

Adres autorów: 02-006 Warszawa, ul. Nowogrodzka 59.

© Zarząd Główny PTS 2016.