
Wiktor Dębicki*

WYKORZYSTANIE DRUKU 3D JAKO PRZEŁOM W MEDYCYNIE XXI WIEKU

Technologia druku 3D jest przełomowym odkryciem, które pozwala w sposób automatyczny wytwarzać obiekty zaprojektowane w programie komputerowym. Dzięki tej technologii zaczęły powstawać części do maszyn, akcesoria, a nawet protezy. Drukarki 3D stały się istotną częścią świata medycyny, możliwości tworzenia i modyfikacji elementów nie mają ograniczeń, co napędza badaczy do poszerzania granic oraz szukania nowych rozwiązań w dziedzinie medycyny. W artykule przeanalizowano technologię druku 3D służącą do wytwarzania elementów: protez, implantów oraz ludzkiej tkanki skórnej. Przedstawiono etapy procesów produkcyjnych związanych z przygotowaniem projektów powyższych kompozytów. Po dokonaniu analizy przedstawiono największe zalety zaproponowanych rozwiązań oraz wskazano kierunki dalszych badań.

THE USE OF 3D PRINTING AS A BREAKTHROUGH IN MEDICINE OF THE 21ST CENTURY

3D printing technology is a breakthrough discovery that allows the automatic production of objects designed in a computer program. In this way, machine parts, accessories and even prostheses began to be created. 3D printers have become an important part of the world of medicine, the possibilities of creating and modifying elements are unlimited, which drives researchers to expand the boundaries and look for new solutions for the medical sphere. The paper analyzes 3D printing technologies used to produce elements: prostheses, implants, human skin tissue. The stages of production processes related to the preparation of projects of the above composites are presented. On the basis of the performed analysis, the greatest advantages and disadvantages of the proposed solutions were presented and directions for further research were indicated.

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Zarządzania, Koło Naukowe „Menadżer Produkcji”.

1. WPROWADZENIE DO DRUKU 3D

Proces druku 3D odbywa się przez nakładanie na siebie wielu warstw materiału, który po utwardzeniu zachowuje pożądany kształt i ma właściwości typowe dla użytego materiału, którym jest filament lub żywica. Do wykonania druku 3D należy użyć cyfrowych modeli, które można uzyskać, wykorzystując np. oprogramowanie CAD, skan 3D lub rezonans magnetyczny. Gotowy model eksportuje się do formatu STL i przetwarza za pomocą oprogramowania zwanego Slicerem (*to slice* – kroić) na zrozumiały dla maszyny kod (np. G-Code – język zapisu poleceń dla urządzeń CNC oraz drukarek 3D) [1]. Proces powstawania obiektu 3D przedstawiono schematycznie na rysunku 1.



Rys. 1. Powstawanie obiektu 3D metodą wytwarzania przyrostowego

Technologia druku 3D to zaawansowana technologia produkcji integrująca komputer, CAD i nowe materiały. Zgodnie z zasadą drukowania warstwa po warstwie, technologię druku 3D dzieli się na różne procesy formowania:

- formowanie utwardzane światłem (SLA – *Stereolithography*),
- selektywne spiekanie laserowe (SLS – *Selective Laser Sintering*),
- selektywne topienie laserowe (SLM – *Selective Laser Melting*),
- produkcja osadzania topionego (FDM – *Fused Deposition Modelling*),
- trójwymiarowe formowanie drukarskie (3DP – *Three Dimensional Printing*).

Najbardziej rozpowszechnioną technologią jest proces osadzania topionego (FDM). Jego zasada działania polega na podgrzaniu i stopieniu włóknistego materiału topliwego, wytłaczaniu go przez ciekłą dyszę oraz nakładaniu i przyklejaniu go warstwa po warstwie zgodnie z modelem plastra [2]. Materiałami stosowanymi w procesie FDM są termoplastyczne tworzywa sztuczne: ABS (terpolimer akrylonitrylo-butadieno-styrenowy) i PLA (poliaktyd). Spełniają one podstawowe wymagania eksploatacyjne oraz mają dobre właściwości mechaniczne i wysoki współczynnik skurczu.

Tworzywo ABS jest polimerem składającym się z trzech monomerów: akrylonitrylu, butadienu i styrenu. Posiada dobre właściwości fizyczne i mechaniczne oraz doskonałą stabilność wymiarową. Druk ABS rozpoczyna się od temperatury mięknięcia wynoszącej 105°C, temperatura drukowania dyszy pozostaje w zakresie 210–240°C, a temperatura płyty grzewczej przekracza 80°C.

Z kolei materiał PLA (rys. 2) to rodzaj materiału biodegradowalnego, który nie zanieczyszcza środowiska. Charakteryzuje się niskim współczynnikiem skurczu i dobrą stabilnością przy drukowaniu modeli wielkogabarytowych. Temperatura topnienia materiału PLA wynosi 145–160°C, temperatura drukowania dyszy 180–200°C, a temperatura płyty grzewczej 60–70°C.

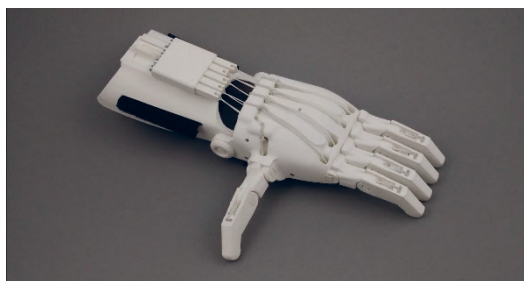


Rys. 2. Materiał PLA stosowany do druku 3D

Źródło: <https://3dwpraktyce.pl/produkt/material-abs/> [dostęp: 31.01.2023]

2. ZASTOSOWANIA DRUKU 3D W MEDYCYNIE

Ciągły rozwój dziedziny druku 3D spowodował, że stał się on również przedmiotem badań w medycynie. Obecnie technologie druku 3D służą do wytwarzania różnego rodzaju elementów protez (rys. 3), implantów (rys. 4), złożonych egzoszkieleatów, a nawet ludzkiej tkanki skórnej. Możliwości są nieograniczone zarówno pod względem wytwarzania, jak i modyfikacji elementów w celu spersonalizowania pod względem indywidualnych potrzeb pacjenta.



Rys. 3. Proteza dłoni

Źródło: [3]



Rys. 4. Implant kości żuchwy

Źródło: [4]

Amerykańska firma 3D Systems [5] zaprojektowała robota, który jest połączeniem wydrukowanego szkieletu z elementami napędu (rys. 5). Opracowany robot jest w stanie pomóc sparaliżowanym pacjentom w samodzielnym poruszaniu się. W prawidłowym odwzorowaniu anatomii człowieka w jego konstrukcji pomogła technologia ręcznego skanowania 3D.



Rys. 5. Egzoszkielet opracowany przez 3D Systems

Źródło: [5]

Inżynierowie opracowali konstrukcję egzoszkieletu wykorzystującego szereg czujników, które pod wpływem zmiany środka ciężkości powodują ruch pacjenta i jednocześnie stabilizują prawidłową jego postawę. Największym wyzwaniem tego projektu było opracowanie takich elementów, które pod wpływem siły poruszającej kończyną pozostaną na swoim miejscu. Do rozwiązywania tych problemów wykorzystano technologię druku 3D.

Kolejnym przykładem wykorzystania druku 3D w medycynie jest drukowanie narzędzi chirurgicznych, potrzebnych i wykorzystywanych m.in. do specjalistycznych operacji przeprowadzanych na niemowlętach. Za pomocą drukarki 3D wytworzono replikę retraktora chirurgicznego (rys. 6) z włókna z kwasu polimlekowego (PLA) obecnie używanego w armii. Retraktor został wysterylizowany zgodnie z protokołami zatwierdzonymi przez Agencję ds. Żywności i Leków, przetestowany na obecność bakterii i naprężony aż do złamania w celu określenia, czy wydrukowany przyrząd może tolerować obciążenia, które występują na sali operacyjnej podczas przeprowadzania zabiegów. W tabeli 1 przedstawiono wyniki badań dotyczących wytwarzania retraktorów dla armii.



Rys. 6. Retraktor chirurgiczny

Źródło: <https://instrumedic.pl/retraktor-chirurgiczny-typu-weitlaner> [dostęp: 31.01.2023]

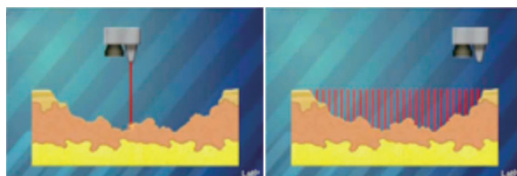
Tabela 1. Wyniki badań – wytwarzanie retraktorów dla marynarki wojennej z włókna PLA

Wyniki (dla jednego instrumentu)	Wnioski
<ul style="list-style-type: none"> – Czas potrzebny na druk wyniósł 90 minut. – Maksymalna wartość siły stycznej przed uszkodzeniem instrumentu wyniosła 13,6 kg – Świeżo wytłoczony retraktor z drukarki był sterylny. – Masa wytworzonego narzędzia wyniosła 16 g. – Koszty wytworzenia pojedynczego retraktora wynosiły tylko 0,46 USD PLA. 	<ul style="list-style-type: none"> – Koszty jednego retraktora wydrukowanego w 3D wynoszą około 1/10 kosztów takiego instrumentu ze stali nierdzewnej. – Retraktor z PLA Army/Navy może tolerować obciążenia występujące podczas operacji. – Świeżo wytworzony retraktor z PLA w czystym środowisku, takim jak sala operacyjna, jest sterylnym, gotowym do użycia instrumentem.

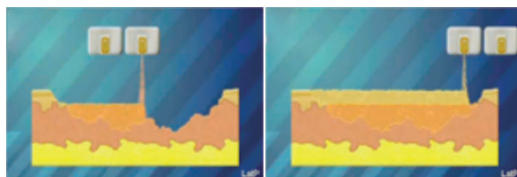
Źródło: opracowanie własne na podstawie [6]

Obecnie na świecie przeprowadza się badania druku 3D z wykorzystaniem komórek skóry jako „atramentu”. Do druku zamiast standardowego filamentu wykorzystuje się dwa typy komórek (do głębokich urazów oraz na warstwę zewnętrzną). Wyniki tych badań pomogą w leczeniu poparzeń skóry. Proces takiego druku wygląda następująco:

- skanowanie oparzenia za pomocą specjalistycznego skanera (rys. 7) oraz skonstruowanie mapy urazu w specjalnym programie 3D (rys. 7),
- przekazanie przez program do biodrukarki załadowanej dwoma typami komórkami zdrowej skóry informacji o tym, który rodzaj komórek ma zastosować, oraz rozpoczęcie ich nakładania (rys. 8),
- drukowanie jednego z dwóch rodzajów komórek: przeznaczonych do głębokich urazów oraz przeznaczonych na warstwę zewnętrzną (rys. 8).

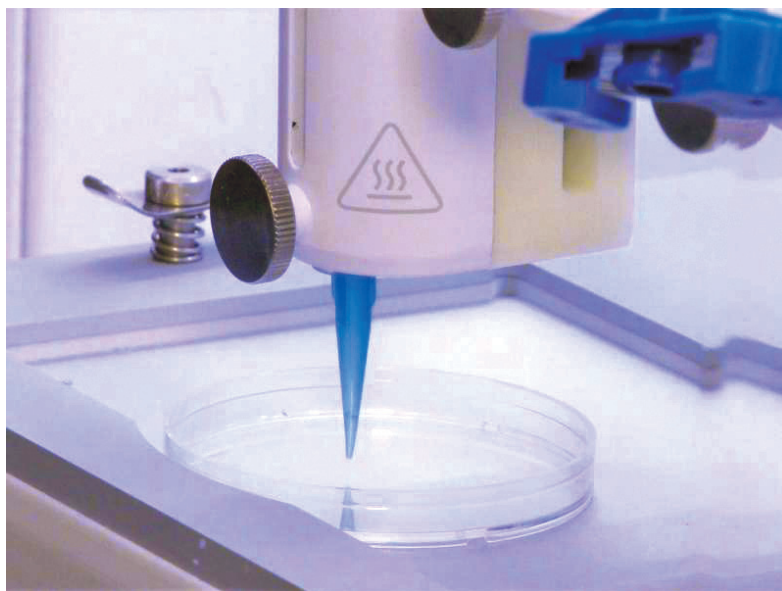
**Rys. 7.** Proces skanowania rany

Źródło: https://cdn.forbot.pl/blog/wp-content/uploads/2015/10/medycyna_21.gif

**Rys. 8.** Wypełnianie rany odpowiednio dobranymi komórkami

Źródło: https://cdn.forbot.pl/blog/wp-content/uploads/2015/10/medycyna_21.gif

Badania nad drukiem tkanek skóry (rys. 9) są obecnie priorytetem rynku badawczego bioprintingu. Postęp w inżynierii tkankowej jest znaczącym krokiem w kierunku tworzenia przeszczepów [7].



Rys. 9. Druk tkanek skóry

Źródło: [8]

Uczeni z Yale School of Medicine pracują nad nową metodą polegającą na tworzeniu biotuszów wykonanych z kolagenu zwierzęcego połączonego z komórkami śródbłonna oraz innymi komórkami strukturalnymi. Gdy zespół z Yale wszczepił go myszy, naczynia ze skóry wydrukowanej przez zespół Rensselaer zaczęły łączyć się z naczyniami własnymi myszy. Jest to niezwykle ważne, ponieważ udowadnia, że istnieje w rzeczywistości transfer krwi i składników odżywczych do przeszczepu, który zapobiega jego odrzuceniu. Aby to rozwiązanie mogło być użyteczne na poziomie klinicznym, badacze muszą umieć „edytować” komórki dawcy za pomocą specjalnej technologii, która umożliwi naczyniom pełne zintegrowanie, dzięki czemu organizm pacjenta je zaakceptuje.

Stosowanie druku przestrzennego 3D najbardziej jest rozpowszechnione w stomatologii. Wyspecjalizowany sprzęt pozwala tworzyć implanty zębowe zdecydowanie szybciej niż przy zastosowaniu tradycyjnych metod. Drukowane implanty są w pełni spersonalizowane, co oznacza, że ich kształt i wielkość całkowicie odpowiadają realnym ubytkom uzębienia danego pacjenta. Szybkie prototypowanie formy (skorupy) protezy dentystycznej (rys. 10) jest przełomowe dla branży stomatologicznej. Druk 3D wytwarza ceramiczne formy odlewnicze do odlewania metali metodą druku przyrostowego. Dzięki nim wyeliminowano wiele czasochłonnych oraz pracochłonnych etapów tradycyjnej techniki odlewania.



Rys. 10. Protezy dentystyczne wykonane metodą druku 3D

Źródło: [9]

Informacje o skanowanym obszarze trafiają do pamięci komputera. Po obróbce odpowiednim oprogramowaniem, na podstawie danych zebranych podczas skanowania tworzy się wirtualny model elementu, który ma powstać z użyciem drukarki 3D. Ten cyfrowy model można „przymierzać” do obrazu uzębienia pacjenta i dowolnie modyfikować kształt i wielkość zębów, które mają być odtworzone. Po zaakceptowaniu przez pacjenta wersji modelu dane cyfrowe trafiają do pamięci drukarki 3D. W niej następuje proces wydruku z wykorzystaniem odpowiedniego filamentu. Urządzenie odczytuje dane zebrane podczas skanowania jamy ustnej i rozpoczyna druk polegający na nakładaniu na siebie kolejnych, cienkich warstw polimeru stomatologicznego – zgodnie z wirtualnym modelem. Czas potrzebny na wydrukowanie protezy stomatologicznej lub protetycznej jest różny i zależy od stopnia zakresu pracy, rodzaju użytego surowca oraz od grubości ścianek i korpusu uzupełnienia [9]. Druk w stomatologii nie ogranicza się jedynie do protez dentystycznych, drukowane są również szyny ortodontyczne (rys. 11), okluzyjne (rys. 12), a także modele przydatne w pracy stomatologa, np. formy odlewnicze mostów i koron (rys. 13) czy szablony chirurgiczne (rys. 14).



Rys. 11. Szyny ortodontyczne koron

Źródło: <https://zortrax.com/pl/applications/digital-dentistry/> [dostęp: 12.02.2023]



Rys. 12. Szyny okluzyjne

Źródło: <https://zortrax.com/pl/applications/digital-dentistry/> [dostęp: 12.02.2023]



Rys. 13. Formy odlewniczych mostów i koron

Źródło: <https://zortrax.com/pl/applications/digital-dentistry/> [dostęp: 12.02.2023]



Rys. 14. Szablony chirurgiczne

Źródło: <https://zortrax.com/pl/applications/digital-dentistry/> [dostęp: 12.02.2023]

3. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono najbardziej przełomowe rozwiązania druku 3D w medycynie. Rozwiązania te mają ogromne znaczenie dla dalszego rozwoju metod badania i leczenia pacjentów. Zastosowanie druku przestrzennego najbardziej rozwinęło się w stomatologii, gdzie wyspecjalizowany sprzęt pozwala w zdecydowanie krótszym czasie tworzyć implanty zębowe. Drukowane implanty są w pełni spersonalizowane pod względem potrzeb konkretnego pacjenta. W przypadku egzoszkieletów oraz protez druk 3D spowodował przede wszystkim większą ich dostępność, a tym samym ułatwił funkcjonowanie z danym schorzeniem, jego leczenie oraz proces rehabilitacji. Najbardziej przełomowe rozwiązanie, jakim jest drukowanie w 3D z wykorzystaniem komórek skóry, jest dopiero na etapie badań. Biotusz – będący osiągnięciem ostatnich badań – przyspiesza gojenie się ran, lecz z upływem czasu ta technologia zostanie udoskonalona na tyle, aby rekonstruować tkankę skórną. Ponadto, za pomocą

drukarek 3D można wytworzyć specjalistyczne narzędzia operacyjne, a koszty ich wykonania w 3D są stosunkowo niższe od kosztów wykonania ze stali nierdzewnej. Druk 3D pozwala również wytwarzać modele anatomiczne do edukacji. Zastosowanie druku 3D w różnych obszarach medycyny minimalizuje ryzyko powikłań, a tym samym zwiększa bezpieczeństwo zabiegów, którym poddany jest pacjent, a także pozwala skrócić czas specjalistycznych operacji, zabiegów oraz procesów leczenia.

Podziękowania

Artykuł powstał na podstawie referatu wygłoszonego podczas 63. Konferencji Studenckich Kół Naukowych Pionu Górniczego, który zajął trzecie miejsce w sekcji. Swoje szczere podziękowania kieruję w stronę Pana dr. inż. Mariusza Niekurzaka, opiekuna Koła Naukowego „Menadżer Produkcji”. Dziękuję za pomoc i ogromne wsparcie na każdym etapie pracy.

LITERATURA

- [1] <https://3dwpraktyce.pl/g-code> [dostęp: 31.01.2023].
- [2] Haghsefat K., Tingting L., *FDM 3D Printing Technology and Its Fundamental Properties*. Conference: ICIRES – 6th International Conference on Innovation and Research in Engineering Sciences at Tbilisi – Georgia, 30 June 2020.
- [3] Matusiewicz K., *e-NABLE i protezy dłoni z drukarki 3D*, <https://3dwpraktyce.pl/2015/10/e-nable-i-protezy-dloni-z-drukarki-3d/> [dostęp: 29.01.2023].
- [4] Ślusarczyk P., *Prototyp implantu kości żuchwy*, <https://3dwpraktyce.pl/2017/06/prototyp-implantu-kosci-zuchwy/> [dostęp: 29.01.2023].
- [5] Griffiths A., *3D-printed exoskeleton helps paralysed users walk again*, <https://www.dezeen.com/2014/03/05/3d-printed-exoskeleton-helps-paralysed-users-walk/> [dostęp: 12.02.2023].
- [6] Rankin M., Giovinco N.A., Cucher D.J., Watts G., Hurwitz B., Armstrong D.G., *Three-dimensional printing surgical instruments: are we there yet?*, *Journal Surgical Research*, vol. 189(2), 2014, s. 193–197, <https://doi.org/10.1016/j.jss.2014.02.020>.
- [7] *Armia USA inwestuje w biodrukowanie 3D do odbudowy narządów ranionych żołnierzy*, <http://www.swiatdruku3d.pl/armia-usa-inwestuje-w-biodrukowanie-3d-do-odbudowy-narzadow-ranionych-zolnierzy/> [dostęp: 31.01.2023].
- [8] *Żywa skóra wraz z naczyniami krwionośnymi wytwarzana przy pomocy druku 3D*, <https://dzienniknaukowy.pl/zdrowie/zywa-skora-wraz-z-naczyniami-krwionosnymi-wytwarzana-przy-pomocy-druku-3d> [dostęp: 29.01.2023].
- [9] Krufczyk M., *Druk 3D w stomatologii*, <https://dentysta.eu/druk-3d-w-stomatologii> [dostęp: 31.01.2023].

