

ANNA LASKA-LEŚNIEWICZ

POLITECHNIKA ŁÓDZKA  
WYDZIAŁ MECHANICZNY  
INSTYTUT INŻYNIERII MATERIAŁOWEJ  
E-MAIL: ANNA.LASKA@DOKT.P.LODZ.PL

## Wykorzystanie metod szybkiego prototypowania (*rapid prototyping*) w nowoczesnej medycynie

### STRESZCZENIE

Metody szybkiego prototypowania wykorzystuje się w wielu dziedzinach. Od kilku lat zauważa się zainteresowanie tymi technologiami również w medycynie, protetyce i inżynierii tkankowej oraz biomedycznej. Tak szerokie zastosowanie metod szybkiego prototypowania związane jest ze względnie niską ceną wytworzenia rzeczywistego modelu 3D oraz szybkością procesu. W medycynie rekonstrukcyjnej i implantacyjnej ceni się je głównie za możliwość dostosowania do indywidualnych potrzeb pacjenta. Do powszechnie stosowanych metod zalicza się stereolitografię, laserowe spiekanie proszków, osadzanie stopionego materiału i druk 3D.

Artykuł zawiera przegląd metod szybkiego prototypowania w odniesieniu do zastosowań w nowoczesnej medycynie, implantologii i inżynierii tkankowej, której produkty (rusztowania tkankowe) umożliwiają regenerację uszkodzonej tkanki pacjenta lub całego narządu. Dodatkowo przedstawiono grupy materiałów, ze szczególnym uwzględnieniem polimerów i biomateriałów polimerowych, które stosuje się z sukcesem w wyżej wymienionych aplikacjach.

### SŁOWA KLUCZOWE

Szybkie prototypowanie, druk 3D, metoda FDM, polimery biodegradowalne

### Wprowadzenie

Obecnie medycyna potrzebuje nowoczesnych rozwiązań, które pozwolą odpowiedzieć na rosnące wymagania pacjentów wysoko i średnio rozwiniętych krajów. Dotychczasowe metody leczenia są stale ulepszane dzięki postępowi odnotowywanemu nie tylko w zakresie medycyny, ale także technologii i techniki. W ostatnich latach zastosowanie szybkiego prototypowa-

nia, a w szczególności druku 3D, zyskało na popularności i stało się alternatywą w procesie tworzenia prototypów. Szybkość i niewielkie koszty spowodowały zainteresowanie tymi metodami nie tylko we wzornictwie przemysłowym, projektowaniu (designie), motoryzacji czy przemyśle, ale także w medycynie, inżynierii biomedycznej i tkankowej.

Szybkie prototypowanie (*rapid prototyping*, RP), znane również pod pojęciem SFF (*solid free-form fabrication*), to grupa technologii przyrostowej wytwarzania AM (*additive manufacturing*) opierająca się na tworzeniu fizycznego obiektu trójwymiarowego metodą warstwa po warstwie<sup>1</sup>. Do technik szybkiego prototypowania zalicza się przede wszystkim stereolitografię SLA (*stereolithography*), spiekanie proszków SLS (*selective laser sintering*), osadzanie stopionego materiału FDM (*fused deposition modelling*) i druk 3D (*3D printing*).

Zastosowań metod RP w medycynie i naukach z nią powiązanych jest coraz więcej. Powszechnie stosuje się już druk 3D do tworzenia modeli dla potrzeb chirurgii rekonstrukcyjnej i implantologii (ryc. 1). Wytwarzanie rusztowań do zasiedlenia komórkami pacjenta i regeneracji danej tkanki (na przykład kostnej, chrzęstnej) to jeden z aktualnych trendów łączących zmagania inżynierii materiałowej i tkankowej. Co więcej, na podstawie danych z tomografii komputerowej drukuje się modele anatomiczne, co pozwala lekarzom przygotować się do skomplikowanych operacji.



Ryc. 1. Model żuchwy wykonany z ABS  
Źródło: materiały własne.

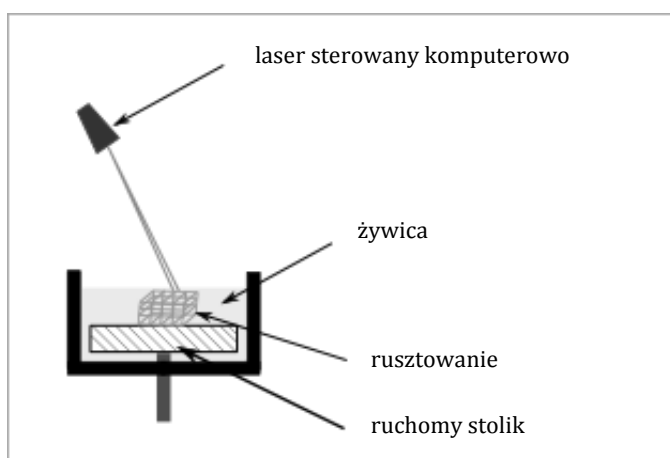
---

<sup>1</sup> I. Zein, *Fused Deposition Modelling of Novel Scaffold Architectures for Tissue Engineering Applications*, "Biomaterials" 2002, No. 23, s. 1169–1185.

## Metody szybkiego prototypowania

### STEREOLITOGRAFIA

Stereolitografia (SLA) jest jedną z pierwszych metod szybkiego prototypowania, a jej początki sięgają połowy lat osiemdziesiątych XX wieku<sup>2</sup>. Firma 3D Systems opracowała tę metodę i skomercjalizowała jako pierwszą spośród technik RP.



Ryc. 2. Schemat urządzenia do wytwarzania rusztowań komórkowych metodą SLA

Źródło: opracowanie własne.

Stereolitografia polega na wytwarzaniu warstwa po warstwie obiektu 3D na podstawie komputerowego modelu stworzonego za pomocą specjalnego programu lub na podstawie danych zebranych z tomografii komputerowej (CT) lub rezonansu magnetycznego (MRI)<sup>3</sup>. Tworzenie rusztowania trójwymiarowego opiera się na przestrzennie kontrolowanym utwardzaniu płynnej żywicy w procesie fotopolimeryzacji. Stosowane są dwa typy urządzeń stereolitograficznych, które różnią się między sobą metodą naświetlania i budową. Na ryc. 2 zaprezentowano urządzenie typu *bottom-up* ze skanującym laserem, drugi typ wykorzystuje cyfrowy projektor świetlny (*digi-*

<sup>2</sup> F. P. Melchels et al., *A Review on Stereolithography and Its Applications in Biomedical Engineering*, "Biomaterials" 2010, No. 31, s. 6121–6130.

<sup>3</sup> J. W. Lee et al., *3D Scaffold Fabrication with PPF/DEF Using Micro-stereolithography*, "Microelectronic Engineering" 2007, No. 84, s. 1702–1705.

tal light projector) i sterowaną komputerowo platformę roboczą<sup>4</sup>. W obu metodach wzór jest wyświetlany na powierzchni żywicy, co prowadzi do jego zestalenia i uzyskania warstwy przylegającej do platformy roboczej. Struktura o pożądanej geometrii i wysokości zostaje ponownie pokryta płynną żywicą, tak by wytworzyć kolejną warstwę rusztowania.

Wśród zalet stereolitografii należy wymienić wysoką rozdzielczość szczegółów i dokładność wymiarową ( $20 \mu\text{m}$ )<sup>5</sup>. SLA pozwala wytworzyć struktury o bardziej skomplikowanej geometrii niż FDM i SLS. Najmniejsze obiekty mają  $50\text{--}200 \mu\text{m}$ .

#### LASEROWE SPIEKANIE PROSZKÓW

Spiekanie proszków metodą SLS (*selective laser sintering*) jest techniką stosującą wiązkę lasera do spiekania cząstek proszku w celu stworzenia trójwymiarowego modelu<sup>6</sup>. Obiekt tworzony jest warstwa po warstwie przez powtarzanie procesu nanoszenia cienkiej warstwy proszku i jego spiekania. Metoda SLS może być stosowana z wykorzystaniem polimerów, metali, ceramiki i proszków kompozytowych.

Proces selektywnego spiekania laserowego przeprowadza się przy użyciu promieniowania laserowego z zakresu podczerwieni (długość fali od  $780 \text{ nm}$  do  $1 \text{ mm}$ ). Źródłem promieniowania jest laser CO<sub>2</sub> lub Nd:YAG. Pierwszym etapem procesu jest rozprowadzenie cienkiej warstwy proszku na stole o regulowanym położeniu w kierunku osi Z. Następnie proszek poddaje się działaniu wiązki laserowej, której położenie jest ściśle określone przy pomocy oprogramowania komputerowego. Sterując parametrami wiązki laserowej, zmienia się proces wytwarzania obiektu. Po spieczeniu proszku w wybranych obszarach stolik jest opuszczany o zadaną wysokość warstwy. Rozprowadzana jest kolejna warstwa proszku i następuje proces jej spiekania. Procedura powtarza się do momentu otrzymania całego modelu.

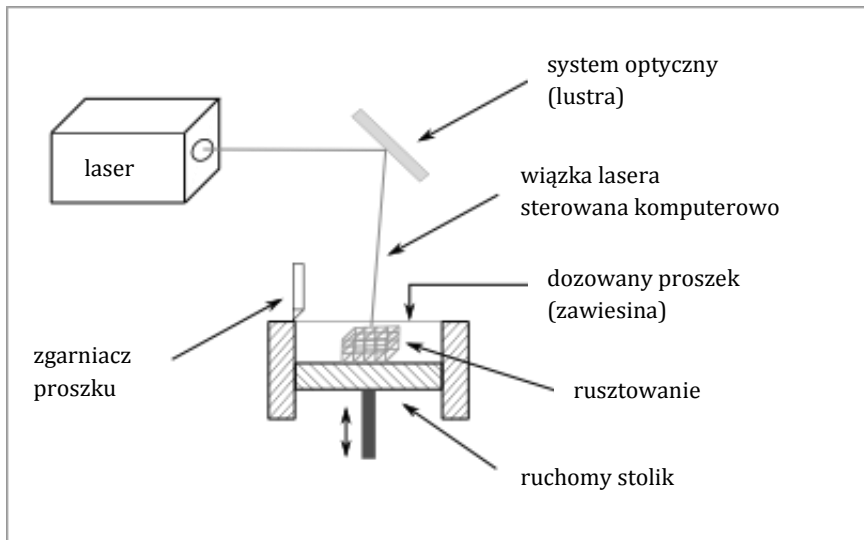
---

<sup>4</sup> F. P. Melchels et al., op. cit.

<sup>5</sup> S. Dzionk, *Modelowanie powierzchni elementów wykonywanych metodą stereolitografii*, „Inżynieria Maszyn” 2013, No. 18, s. 7–19.

<sup>6</sup> J. Kundu et al., *Biomaterials for Biofabrication of 3D Tissue Scaffolds*, [w:] *Biofabrication. Micro- and Nano-fabrication, Printing, Patterning and Assemblies*, William Andrew, USA 2013; L. Fwu-Hsing, *Selective Laser Sintering of a Hydroxyapatite-silica Scaffold on Cultured MG63 Osteoblasts in Vitro*, „International Journal of Precision Engineering and Manufacturing” 2012, No. 13, s. 439–444; F. E. Wiria et al., *Improved Biocomposite Development of Poly(Vinyl Alcohol) and Hydroxyapatite for Tissue Engineering Scaffold Fabrication Using Selective Laser Sintering*, „Journal of Materials Science. Materials in Medicine” 2008, No 19, s. 989–996.

Schemat urządzenia do selektywnego spiekania proszków został przedstawiony na ryc. 3. Jego podstawowe elementy to: laser (CO<sub>2</sub> lub Nd:YAG), system optyczny (lustra), ruchomy stolik, zgarniacz proszku i system dostarczający proszek do układu.



Ryc. 3. Schemat urządzenia do selektywnego spiekania laserowego

Źródło: opracowanie własne.

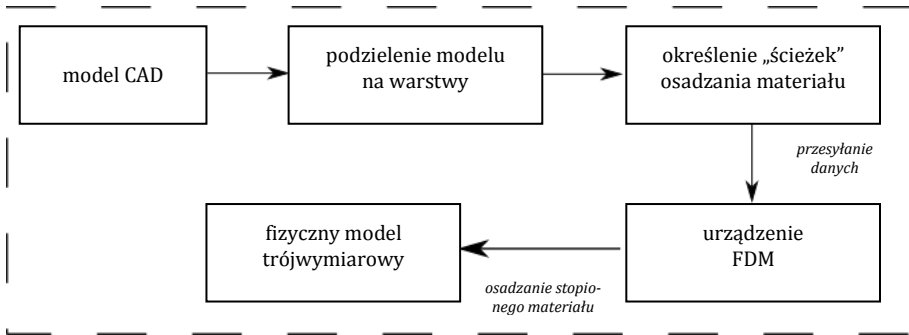
#### OSADZANIE STOPIONEGO MATERIAŁU

Osadzanie stopionego materiału (FDM) jest powszechnie stosowaną technologią prototypowania, zapewniającą szybkie i łatwe wytwarzanie skafoldów<sup>7</sup>. W tej metodzie obiekt trójwymiarowy jest tworzony na podstawie modelu komputerowego. Rzeczywiste obiekty są skanowane przy pomocy tomografu komputerowego lub rezonansu magnetycznego lub modele są bezpośrednio tworzone w odpowiednich programach komputerowych.

Głównym elementem urządzenia do osadzania stopionego materiału jest wylączarka wyciskająca termoplastyczny wsad, który najpierw zostaje podgrzany do odpowiedniej temperatury w celu jego stopnienia. Następnie stopiony materiał, polimer lub kompozyt polimer-ceramika osadzany jest na stoliku warstwa po warstwie. Technika ta umożliwia kontrolę wewnętrzną

<sup>7</sup> I. Zein, op. cit.

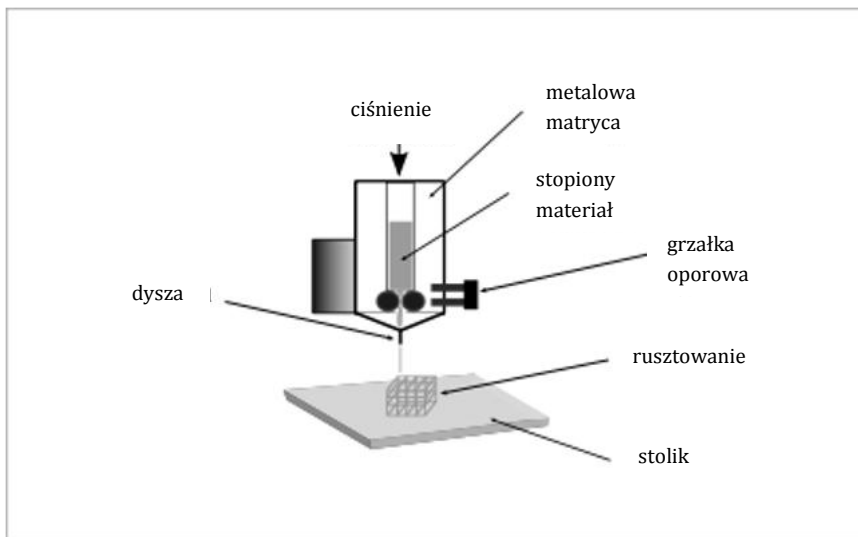
struktury rusztowania pod tkanki, to zależy jego porowatości, wielkości włókien i porów oraz ich ułożenia. Ryc. 4 przedstawia uproszczoną ścieżkę powstawania rzeczywistego modelu z modelu CAD.



Rys. 4. Schemat procesu osadzania stopionego materiału

Źródło: opracowanie własne.

Poniżej zaprezentowano schematyczny model urządzenia wykorzystującego tę technikę szybkiego prototypowania (ryc. 5).



Rys. 5. Wyciskanie i osadzanie materiału w procesie FDM

Źródło: opracowanie własne.

Na końcowy produkt, gotowy do zasiedlenia przez komórki, mają wpływ następujące parametry procesu:

- prędkość przemieszczania się głowicy,
- szybkość podawania stopionego materiału,
- średnica dyszy,
- temperatura procesu (temperatura topnienia materiału wsadowego).

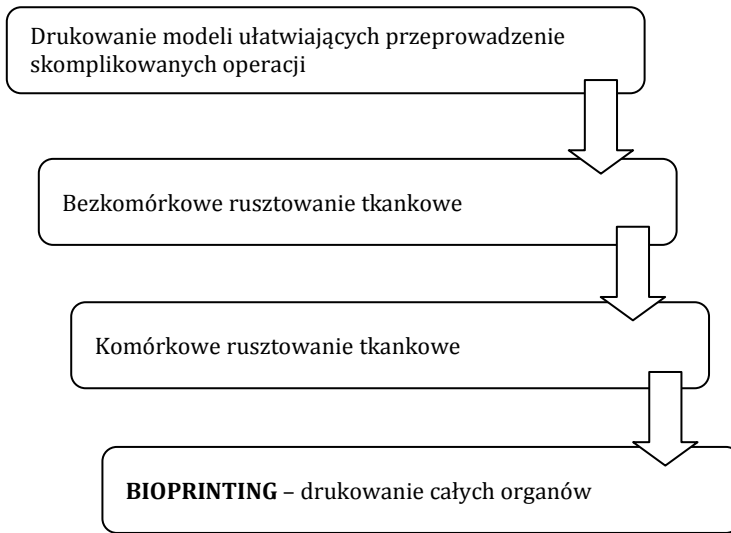
## DRUK 3D

Trójwymiarowe drukowanie wykorzystuje koncept drukowania atramentowego, w którym materiał (tusze) jest wypuszczany przez głowicę<sup>8</sup>. Głowica porusza się nad powierzchnią materiału w postaci proszku na podstawie informacji o przekrojach poprzecznych szkieletu określonych przez operatora procesu. Jednocześnie głowica wypuszcza lepiszcze łączące cząsteczki proszku, co przypomina proces spiekania laserowego. Następnym etapem jest obniżenie się platformy z wytworzoną warstwą, ponowne rozprowadzenie proszku i łączenie go. Tak powstają kolejne warstwy drukowanego obiektu.

Trójwymiarowe drukowanie znajduje potencjalnie szerokie zastosowanie w medycynie, na przykład modele narządów do przedoperacyjnych przygotowań, drukowanie skóry, naczyń krwionośnych, części zamiennych serca, protez gałki ocznej, nosa, stworzenie ażurowego gipsu oraz szereg aplikacji w ortodoncji. W inżynierii tkankowej można zauważyć rozwój w kierunku drukowania całych gotowych organów (ryc. 6).

---

<sup>8</sup> J. Inzana et al., *3D Printing of Composite Calcium Phosphate and Collagen Scaffolds for Bone Regeneration*, "Biomaterials" 2014, No. 35, s. 4026–4034; S. Maleksaedy et al., *Toward 3D Printed Bioactive Titanium Scaffolds with Bimodal Pore Size Distribution for Bone Ingrowth*, "Procedia CIRP" 2013, No. 5, s. 158–163.



Ryc. 6. Kierunek rozwoju drukowania 3D w medycynie  
Źródło: opracowanie własne.

## Materiały stosowane w metodach szybkiego prototypowania

W metodach szybkiego prototypowania wykorzystuje się bardzo szeroką gamę materiałów. Ich dobór jest ściśle związany z aplikacją wytworzonego modelu/prototypu. W przypadku tworzenia poglądowego modelu do wizualizacji i planowania zabiegu można wykorzystać stosunkowo tanie materiały, na przykład polimery ABS czy PLA o czystości technicznej. Do wytwarzania zindywidualizowanych elementów implantowanych w organizm pacjenta potrzebne są biomateriały, które będą spełniać szereg wymogów – przede wszystkim muszą być biozgodne, biokompatybilne oraz nie mogą wywoływać reakcji alergicznych i toksycznych. Z dużym powodzeniem wykorzystuje się polimery biodegradowalne, takie jak polilaktyd (PLA), poliglikolid (PGA), kopolimer polilaktyd-glikolid (PLGA), polikaprolakton (PCL), oraz polimery naturalne, jak chityna, chitozan i kolagen, czy polimery z grupy siloksanów, na przykład polidimetylosiloksan (PDMS). W tab. 1 zostały przedstawione poszczególne grupy materiałów i możliwości ich zastosowania w omawianych technikach szybkiego prototypowania.



Tab. 1. Podsumowanie technik szybkiego prototypowania i stosowanych materiałów

	Metody szybkiego prototypowania			
	SLA	SLS	FDM	3DP
reguła tworzenia materiału	fotopolimeryzacja	spiekanie proszków	wyciskanie stopionego materiału	proszek + osadzanie spoiwa
polimery	+	+	+	+
hydrożele	+	-	+	+
ceramika	+	+	+	+
metale	-	+	+	+
kompozyty	+	+	+	+
komórki	+	-	+	+

Źródło: F. P. Melchels et al., *A Review on Stereolithography and Its Applications in Bio-medical Engineering*, "Biomaterials" 2010, No. 31.

## Podsumowanie

Metody szybkiego prototypowania cechują się wytwarzaniem modelu trójwymiarowego warstwa po warstwie, formatem .STL oraz możliwością wykorzystania różnych materiałów w procesie wytwarzania. Szybkie prototypowanie znalazło szereg zastosowań w motoryzacji, przemyśle, wzornictwie przemysłowym, projektowaniu czy architekturze. Również w medycynie i inżynierii biomedycznej coraz chętniej wykorzystuje się te technologie. Przypuszcza się, że rozwój metod szybkiego prototypowania, a szczególnie druku 3D i biodruku, przyczyni się do odnalezienia skutecznych sposobów leczenia wielu schorzeń i chorób.

## RAPID PROTOTYPING METHODS IN MODERN MEDICINE

## ABSTRACT

Rapid prototyping methods are used in many branches. For several years those technologies has been receiving a great deal of attention in medicine, prosthetics, tissue engineering and biomedical engineering. Low cost and lead time of 3D model production may explain such wide application. In regenerative medicine and implantology it is recognized by their possibility of product personalization to patient's needs. The most commonly used methods are stereolithography, selective laser sintering (SLS), fused deposition modelling (FDM), and 3D printing.

The article contains the overview of rapid prototyping methods that are used in modern medicine, implantology and tissue engineering. Products of tissue engineering – scaffolds enable patient's tissue regeneration or even whole patient's organ. Moreover, biomaterials used in mentioned application are presented, especially biodegradable polymers.

## KEYWORDS

Rapid prototyping, 3D printing, FDM, biodegradable polymers

## BIBLIOGRAFIA

1. Dzionk S., *Modelowanie powierzchni elementów wykonywanych metodą stereolitografii*, „Inżynieria Maszyn” 2013, No. 18, s. 7–19.
2. Fwu-Hsing L., *Selective Laser Sintering of a Hydroxyapatite-silica Scaffold on Cultured MG63 Osteoblasts in Vitro*, “International Journal of Precision Engineering and Manufacturing” 2012, No. 13, s. 439–444.
3. Inzana J. et al., *3D Printing of Composite Calcium Phosphate and Collagen Scaffolds for Bone Regeneration*, “Biomaterials” 2014, No. 35, s. 4026–4034.
4. Kundu J. et al., *Biomaterials for Biofabrication of 3D Tissue Scaffolds*, [w:] *Biofabrication. Micro- and Nano-fabrication, Printing, Patterning and Assemblies*, William Andrew, USA 2013.
5. Lee J. W. et al., *3D Scaffold Fabrication with PPF/DEF Using Micro-stereolithography*, “Microelectronic Engineering” 2007, No. 84, s. 1702–1705.
6. Maleksaedy S. et al., *Toward 3D Printed Bioactive Titanium Scaffolds with Bimodal Pore Size Distribution for Bone Ingrowth*, “Procedia CIRP” 2013, No. 5, s. 158–163.
7. Melchels F. P. et al., *A Review on Stereolithography and Its Applications in Biomedical Engineering*, “Biomaterials” 2010, No. 31, s. 6121–6130.
8. Wiria F. E. et al., *Improved Biocomposite Development of Poly(Vinyl Acohol) and Hydroxyapatite for Tissue Engineering Scaffold Fabrication Using Selective Laser Sintering*, “Journal of Materials Science. Materials in Medicine” 2008, No 19, s. 989–996.
9. Zein I., *Fused Deposition Modelling of Novel Scaffold Architectures for Tissue Engineering Applications*, “Biomaterials” 2002, No. 23, s. 1169–1185.