

**Emilia MAZGAJCZYK, Patrycja SZYMCZYK, Edward CHLEBUS**, Katedra Technologii Laserowych, Automatykacji i Organizacji Produkcji, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska, Wrocław

## ZASTOSOWANIE TECHNOLOGII REP-RAP DO WYTWARZANIA FUNKCJONALNYCH STRUKTUR Z PLA

**Streszczenie:** W niniejszej pracy skupiono się na omówieniu technologii addytywnej, jaką jest technologia „Rep-Rap”, w kontekście zastosowania jej w inżynierii tkankowej. Określono parametry mające największy wpływ na jakość wytwarzanych elementów. Wykazano wpływ temperatury głowicy na geometrię wytwarzanej struktury. Materiał, który został wykorzystany w procesie to biodegradowalny oraz biokompatybilny polimer (PLA-Polilaktyd), powszechnie stosowany w inżynierii regeneracyjnej.

**Słowa kluczowe:** Rep-Rap, skafold, PLA, Rapid Prototyping

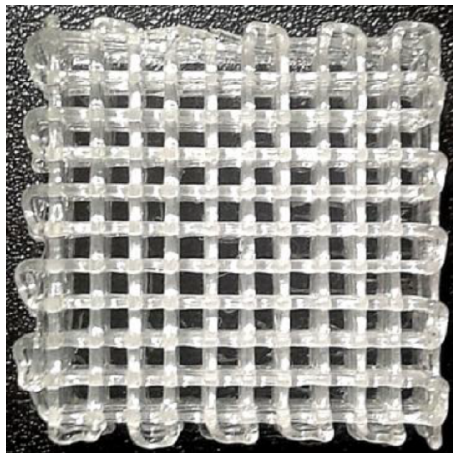
### 1. WSTĘP

Wiek XX przeszedł do historii, jako okres niespotykanego wcześniej rozwoju nauki i techniki. W XXI wiek wkroczyliśmy rozwijając wiele dziedzin, między innymi inżynierię tkankową, która jako zagadnienie interdyscyplinarne łączy wiedzę naukowców zarówno z dziedzin inżynierii materiałowej, chemii oraz nowoczesnych technologii z medycyną. Inżynieria tkankowa to interdyscyplinarna dziedzina nauki stosowana m.in. w leczeniu dużych ubytków kości spowodowanych np. usunięciem tkanki zmienionej przez nowotwór, których organizm nie jest w stanie samodzielnie zregenerować. Odbywa się to poprzez projektowanie i produkowanie rusztowań komórkowych (skafoldów). W tym celu rozwijane są metody polegające na stworzeniu warunków do odbudowy tkanki rodzimej na specjalnych rusztowaniach komórkowych – skafoldach, wszczepianych do organizmu w miejscu, w którym taka tkanka jest potrzebna [1]. Macierz międzykomórkowa, w której znajdują się komórki, chroni je przed mechanicznymi uszkodzeniami, a dodatkowo umożliwia ich proliferację, migrację oraz namnażanie. Siatka włókien zanurzonych w macierzy umożliwia adhezję komórek na ich powierzchni. Najlepiej aby skafold, jak najwierniej odwzorowywał architekturę ECM (*extracellular matrix*) i pozwalał komórkom zachowywać się tak jak w macierzystej tkance. Komórki wymagają osadzenia ich w strukturach trójwymiarowych, z połączonymi porami, tak by mogły przerastać w głąb rusztowania oraz wytwarzać naczynia krwionośne. Porowata konstrukcja stanowiąca rusztowanie dla komórek podczas hodowli *in vitro* musi także przenosić obciążenia biomechaniczne po implantacji *in vivo*. Inżynieria tkankowa wykorzystuje wiele różnorodnych materiałów oraz procesów by z sukcesem zregenerować uszkodzoną strukturę. Zastosowanie technologii generatywnych pozwoli na pełną kontrolę nad docelową geometrią struktury skafoldu oraz zapewni wysoką powtarzalność procesu wytwórczego. Proces wytwarzania struktur w technologiach generatywnych (*Rapid Prototyping* RP) odbywa się warstwa po warstwie, na podstawie modelu zaprojektowanego w programie CAD, bądź uzyskanego dzięki rekonstrukcjom

geometrycznym w badaniach *Reverse Engineering*, podzielonego na warstwy o odpowiednio dobranej zadanej grubości. Mając na uwadze złożony kształt, jakim charakteryzują się struktury przestrzenne o otwartej porowatości, ważne staje się ich dokładna charakteryzacja, zwłaszcza tak istotnych cech jak jakość powierzchni, porowatość całkowita, czy średnica prętów [2].

Dotychczas najwięcej badań nad przyrostowym wytwarzaniem struktur skafoldowych dotyczyło technologii *3D Printing* (3DP) oraz *Fused Deposition Modeling* (FDM). Przy wytwarzaniu tego typu struktur, problemem staje się usuwanie nadmiarowego materiału właściwego (*build material*) lub materiału wspierającego (*support material*) z wnętrza struktury [3]. W przypadku technologii opartych na dwóch materiałach jak w FDM rozwiązanie problemu jest prostsze – materiał wspierający jest inny niż materiał właściwy i może być rozpuszczalny, co ułatwia jego usuwanie. W proszkowych technologiach przetwarzających proszki metali (*powder-bed*), takich jak *Selective Laser Sintering* i *Selective Laser Melting*, kolejne warstwy modelu budowane są z nowo naniesionego proszku, bezpośrednio na poprzednich warstwach, co zapewnia trwałe połączenie w obrębie całego modelu. W tym wypadku materiał właściwy jest równocześnie materiałem wspierającym i możliwość usunięcia jego niezwiązanej objętości zależy w największym stopniu od wielkości cząstek proszku i jego sypkości. Nakłada to jednak ograniczenia na najmniejsze wielkości otworów w strukturze, przez które można usunąć proszek [4].

Ciekawym rozwiązaniem wydaje się być bezpośrednie wytworzenie funkcjonalnych struktur, mających na celu odbudowę uszkodzonych tkanek. Dlatego też, w niniejszej pracy przedstawiono technologię Rep-Rap, która jest jedną z przedstawicielek generatywnych technik wytwarzania. Przykładowa struktura trójwymiarowa wytworzona w oparciu o tą technologię została przedstawiona na rysunku 1.



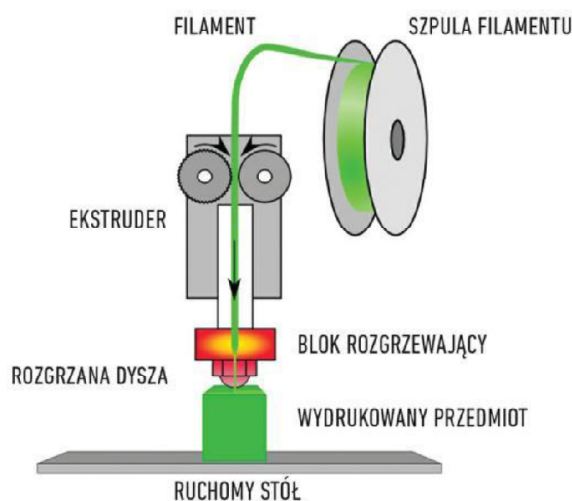
**Rys. 1. Trójwymiarowe rusztowanie wykonane w technologii Rep-Rap z PLA**

Optymalizacja procesu wytwórczego, obejmująca dobór odpowiednich parametrów procesu, jest niezwykle ważna z punktu widzenia wytwarzania struktur o tak skomplikowanej geometrii. Celem niniejszej pracy było określenie parametrów, mających wpływ na budowaną strukturę. W ramach zadań badawczych określono wpływ temperatury głowicy plotującej na geometrię pojedynczej ścieżki. Analizę geometryczną wytworzonych ściegów przeprowadzono z wykorzystaniem metod mikroskopii konfokalnej oraz skaningowego mikroskopu elektronowego. Do wytworzenia próbek jednowymiarowych, wybrano biodegradowalny oraz biokompatybilny materiał polimerowy (PLA - polilaktyd).

## 2. TECHNOLOGIA REP-RAP

Technologie generatywne są dynamicznie rozwijającymi się metodami wytwórczymi w ostatnich latach. Technologie te stanowią grupę metod wytwórczych, w których budowa modeli fizycznych następuje generatywnie (addytywnie, przyrostowo) tj. poprzez dodawanie warstwa po warstwie materiału w celu uzyskania zaprojektowanego kształtu. Metody warstwowego wytwarzania (*Layered Manufacturing* LM) są wykorzystywane do szybkiego prototypowania. Na rynku istnieje wiele procesów LM, których wspólnym mianownikiem jest przyrostowość [5].

Zasada działania technologii Rep-Rap (*Replicating Rapid Prototyper*) polega na wytwarzaniu przy pomocy topionego filamentu, tj. materiału wykorzystywanego do budowy modeli, w postaci drutu o średnicy 3 mm. Główną rolę pełni głowica, która rozgrzewa aplikowany materiał. Schemat urządzenia przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat głowicy drukującej urządzenia Rep-Rap

Spośród parametrów, które mają istotny wpływ na proces wytwarzania za pomocą technologii Rep-Rap, można wyróżnić:

- temperaturę przetwarzania ( $T_g$  [°C]) – temperatura dyszy (głowicy) wytłaczającej,
- temperaturę platformy ( $T_p$  [°C]) – podwyższona temperatura stołu roboczego pozwala na lepsze przywieranie pierwszych warstw do powierzchni,
- wysokość warstwy ( $Z$  [mm]) – sterująca rozdzielczością warstw, ograniczana odgórnie przez otwór w dyszy wytłaczającej,
- prędkość budowania ( $V_g$  [mm/min]) – szybkość posuwu dyszy w osiach XY, wyróżniona dla różnych etapów procesu,
- średnica dyszy ( $D$  [mm]).

## 3. MATERIAŁ I METODA

Stosowane w medycynie materiały polimerowe możemy podzielić na dwie główne grupy: pochodzenia naturalnego oraz syntetycznego. Każde z nich muszą spełniać wymogi norm. Odnosi się to nie tylko do produkcji, ale również do ich przetwarzania w końcowym etapie, sterylizacji oraz do odpowiedniego określenia jak wyrób zachowuje się w środowisku tkankowym. Właściwości biologiczne oraz mechaniczne kwalifikują wyrób polimerowy do kategorii produktów medycznych.

Produkty degradacji polimerów bioresorbowalnych to związki przemiany materii, które występują w organizmie i są naturalnie usuwane (np. kwas mlekowy), bądź stanowią składnik tkanek, należą więc do produktów nieszkodliwych. W odróżnieniu od degradacji polimerów bioresorbowalnych, produkty rozkładu polimerów biodegradowalnych nie występują w organizmie. Wspólną cechą rozkładu wyżej wymienionych polimerów jest nieszkodliwość produktu dla pacjenta. Większość polimerów syntetycznych ulega rozkładowi przez hydrolizę i są odporne na procesy enzymatyczne, co powoduje, że są nietoksyczne dla pacjenta. Polilaktyd (PLA) należy właśnie do tej grupy polimerów [6].

Trójwymiarowe wydruki przeznaczone do analizy wykonano z PLA, który w postaci drutu o średnicy 3 mm był przetwarzany na urządzeniu Rep-Rap. Stałe parametry technologiczne, zastosowane w trakcie wytwarzania to:

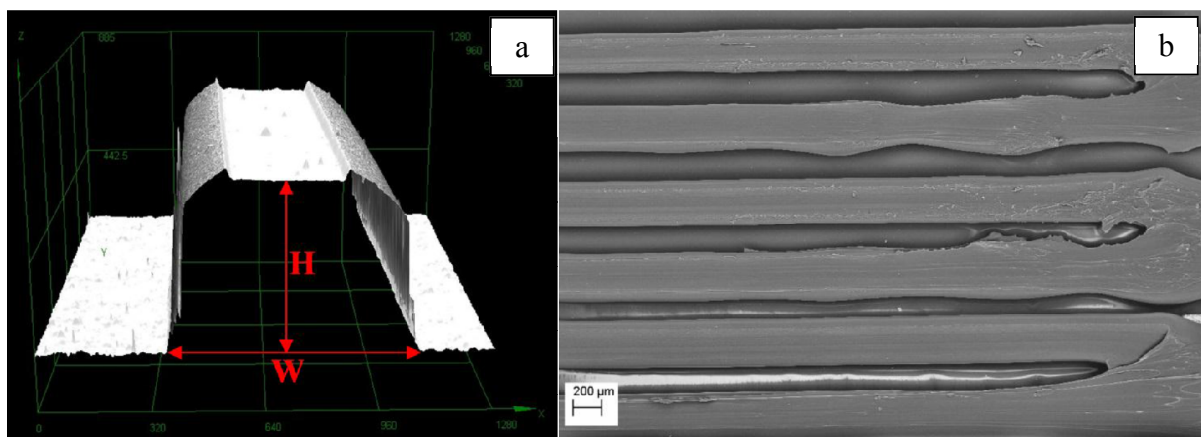
- średnica dyszy: 0,5 mm;
- temperatura platformy: 80 °C;
- wysokość dyszy nad platformą: 0,35 mm
- prędkość poruszania głowicy: 1260 mm/min.

Jako parametr zmienny procesu zastosowano temperaturę głowicy drukującej, gdzie dochodzi do uplastycznienia drutu z PLA, który jest wytłaczany przez dyszę urządzenia plotującego o średnicy 0,5 mm. Na podstawie wcześniejszych doświadczeń, wybrano trzy temperatury tj. 190, 200 i 210 [°C], dla których wytworzono pojedyncze wydruki.

Celem badań, przedstawionych w niniejszej pracy, było określenie wpływu temperatury głowicy plotującej na geometrię pojedynczej drukowanej ścieżki, wytwarzanej z materiału w postaci polimerowego drutu. Za pomocą mikroskopu konfokalnego (MK) wykonano zdjęcia topografii analizowanej struktury mierząc jej podstawowe charakterystyki geometryczne tj. grubość i szerokość (rys. 3).

### 3.1. Charakteryzacja geometryczna

Każdy wydruk przy zadanym zestawie parametrów składał się z 8 ścieżek. Pojedyncza ścieżka została zmierzona w dwóch miejscach, co w sumie dało 16 pomiarów dla jednej serii. Badano wysokość (H) oraz szerokość ścieżki (W) (rys. 3a).

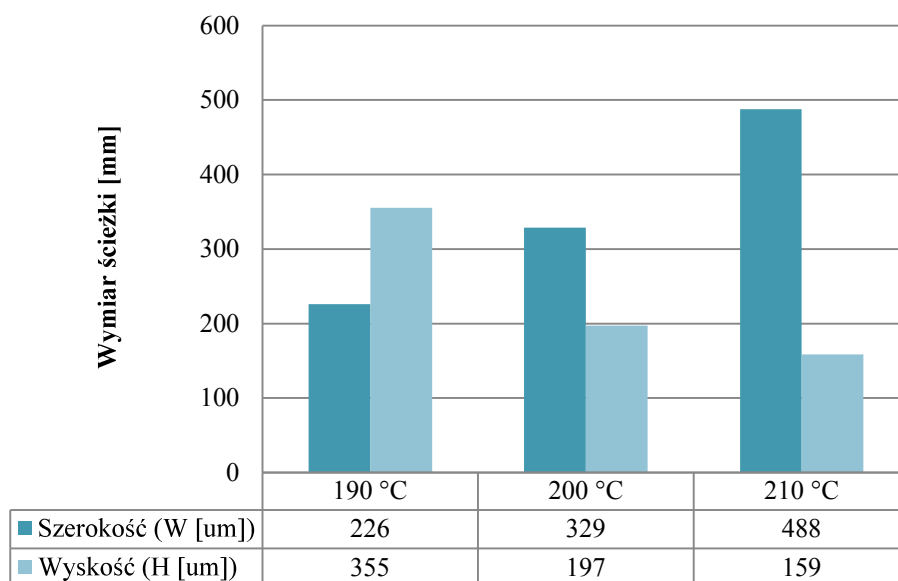


Rys. 3. a – sposób pomiaru wysokości (H) oraz szerokości (W) pojedynczej ścieżki -MK, b – widok wytworzonych ścieżek, SEM

Analiza powierzchni wytworzonych trójwymiarowych próbek została wykonana za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego, jako uzupełnienie wyników. Obraz SEM przykładowych ścieżek przedstawiono na rysunku 3b. Wykonane zdjęcia ich powierzchni, miały na celu zobrazowanie jakości wykonanych druków.

### 3.2. Wyniki badań

Na wykresie (rys. 4) przedstawiono zmierzone wartości podstawowych charakterystyk geometrycznych obejmujących wysokości oraz szerokości wydrukowanej ścieżki.



Rys. 4. Wpływ temperatury głowicy na geometrię ścieżki

W wyniku analizy stwierdzono, że zmiana temperatury, w której polimer jest przetwarzany ma duży wpływ na geometrię ścieżki. Jej wysokość zmienia się ponad dwukrotnie i dla najniższej analizowanej temperatury wartość ta wynosi 355 μm, natomiast dla temperatury na poziomie 210 °C uzyskana wartość jest niższa i wynosi 159 μm. Szerokość ścieżki wykazuje przeciwną zależność, im wyższa temperatura głowicy drukującej, tym szersza ścieżka. Jest to zgodne z oczekiwaniami, gdyż im materiał jest bardziej rozgrzany, tym większe prawdopodobieństwo, że ścieżka będzie się „rozpływać” na platformie w trakcie procesu wytwarzania, stąd największa szerokość przy najniższej wysokości (tj. dla 210 °C).

Należy zwrócić uwagę na to, że idealną geometrię ścieżki otrzymujemy wtedy, gdy jej przekrój jest kołowy, a więc wtedy gdy szerokość jest zbliżona do jej wysokości. W celu określenia jakości wytworzonych druków, wyznaczono stosunek wysokości ścieżek do ich szerokości ( $H/W [-]$ ), który powinien w idealnym przypadku wynosić 1. Wartość tego parametru przedstawiono w tabeli poniżej.

Tab. 1. Stosunek szerokości do wysokości ścieżki

	W	H	W/H
190 °C	226	355	1.6
<b>200 °C</b>	<b>329</b>	<b>197</b>	<b>0.6</b>
210 °C	488	159	0.3

Przeprowadzona analiza ujawniła, że optymalny zestaw parametrów technologicznych uzyskano dla temperatury głowicy wynoszącej 200 °C.

Analiza mikroskopowa wykazała, że kształt ścieżek jest nieregularny, niezależnie od zastosowanych parametrów procesu. Druki nie posiadają regularnego przekroju kołowego, co potwierdzają uzyskane wyniki wyznaczonej doświadczalnie zależności szerokości ścieżki do

jej wysokości. Zaobserwowane zagłębienia na powierzchniach wytworzonych ścieżek, powstały w wyniku przesuwania igły dozującej.

#### 4. PODSUMOWANIE

Technologie addytywne pozwalają na wytwarzanie obiektów zawierających funkcjonalne struktury wewnętrzne. Jednym z obszarów aplikacji tych technologii jest wytwarzanie skafoldów medycznych, stanowiących substytut tkanki kostnej. Ze względu na zjawiska zachodzące podczas procesu wytwarzania, konieczne jest odpowiednie projektowanie każdego procesu pod kątem wytwarzanych kształtów geometrycznych. W przypadku struktur funkcjonalnych o celowo wprowadzonej porowatości globalnej, istotna jest wysoka jakość odwzorowania powierzchni i dokładność geometryczna.

W wyniku przeprowadzonych badań ujawniono, że temperatura głowicy dozującej istotnie wpływa na jakość wytworzonych ścieżek. Optymalizacja procesu wytwórczego umożliwiła uzyskanie powtarzalnych średnic ścieżek, o przekroju zbliżonym do kołowego. Dalsze kierunki badań, obejmują wytworzenie przestrzennych struktur (skafoldów) oraz przeprowadzenie szeregu badań, mających na celu określenie możliwości potencjału aplikacyjnego poprzez spełnienie wymagań wytrzymałościowych stawianych przed projektowaną konstrukcją.

#### LITERATURA

- [1] Szymczyk P., Dybała B., Chlebus E., Fabrication of bone scaffolds from Ti-6Al-7Nb alloy by Selective Laser Melting, E-MRS 2013 FALL MEETING, Warsaw University of Technology, September 16, 2013
- [2] Szymczyk P., Pawlak A., Ziółkowski G., Dybała B., Chlebus E., Charakteryzacja geometryczna i mechaniczna skafoldów ze stopu Ti6Al7Nb wytworzonych w technologii laserowej mikrometalurgii, Aktualne Problemy Biomechaniki. 2013, z. 7, s.157-162
- [3] Murphy CM., Haugh MG., O'Brien FJ., The effect of mean pore size on cell attachment, proliferation and migration in collagen-glycosaminoglycan scaffolds for tissue engineering. Biomaterials. 2010; 31(3):461-6
- [4] Chlebus E., Kurzynowski T.: Przegląd technik Rapid Prototyping do budowy metalowych modeli prototypowych, Górnictwo Odkrywkowe, nr 5/6, 2006 R. 48, s.71-74
- [5] Mazgajczyk E.: Technologie generatywne na przykładzie Bioplotowania, Nowe trendy w naukach inżynierskich 4, t.1, 2013, s. 54-62
- [6] Liu X., Ma P. X.: Polymeric Scaffolds for Bone Tissue Engineering, Annals of Biomedical Engineering, Vol 32, No 3, 2004, s. 477-486

### PLA SCAFFOLDS MANUFACTURED BY REP-RAP TECHNOLOGY

**Abstract:** This study describes one of the additive technology, which is RepRap technique, in the context of its application in tissue engineering. The parameters, which have to greatest impact on the quality of printed structures, were specified. The purpose of present work is showing the influence of temperature of the plotting head on the scaffold geometry. The material that was used in the process are biodegradable and biocompatible polymer (PLA-poly lactide), commonly used in tissue engineering.