

Fabrication of the titanium cellular structures by selective laser melting for medical applications

Tytan i jego stopy są podstawowymi materiałami metalicznymi stosowanymi w medycynie ze względu na ich wysoką biogodność z płynami organicznymi człowieka, dobrą odporność na korozję w tym środowisku oraz dużą względną wytrzymałość na rozciąganie (R_m/δ). Moduł Younga litego tytanu jest mniejszy w porównaniu do stali austenitycznej oraz stopów kobaltu. Wciąż jednak jest większy niż kości o budowie gąbczastej co prowadzi do zjawiska ekranowania naprężeń oraz zaniku tkanki kostnej. Wprowadzenie implantu tytanowego powoduje przejście obciążeń, szczególnie w układzie kostnym człowieka i prowadzi do zaniku tkanki kostnej. Stąd konieczność obniżenia sztywności tych implantów spowodowanej wciąż dużym modułem Younga. Jednym ze sposobów jest zastąpienie materiałów litych porowatymi. Dodatkowo, wprowadzenie materiałów porowatych o określonej porowatości otwartej i odpowiednich wielkości porów umożliwia wzrost komórkom ludzkim oraz transport składników odżywczych w organizmie człowieka. Jednocześnie umożliwia więc również wypełnienie implantu tkanką kostną. Wśród technik wytwarzania materiałów metalicznych o budowie komórkowej (ang. cellular structures) największe zastosowanie mają procesy wytwarzania przyrostowego - druk 3D. Umożliwiają wytworzenie, warstwa po warstwie, trójwymiarowych implantów z użyciem wiązki lasera (ang. Selective Laser Melting, SLM) lub elektronów (ang. Electron Beam Melting, EBM). Dobór parametrów procesu wytwarzania umożliwia uzyskanie materiału implantu o gęstości zbliżonej do gęstości teoretycznej oraz o właściwościach mechanicznych materiału odlewów. Należy podkreślić również, że techniki przyrostowe umożliwiają wytwarzanie implantów o indywidualnych cechach geometrycznych dostosowanych do potrzeb anatomicznych pacjenta. Analiza danych literaturowych wskazuje, że wciąż wytwarzanie materiałów porowatych o rozmiarach porów $< 200 \mu\text{m}$, określonej morfologii składników fazowych mikrostruktury oraz właściwościach użytkowych są nadal wyzwaniem dla procesów przyrostowych.

Stąd celem pracy jest próba wytworzenia implantów o budowie komórkowej i o zmiennej porowatości, różnej architekturze wewnętrznej i sztywności zbliżonej do tkanki kostnej, oraz dużej wytrzymałości i dobrej biogodności. Zakres pracy obejmuje: (I) analizę porównawczą komercyjnych technologii druku 3D z uwzględnieniem cech charakterystycznych implantów, (II) opracowanie kształtu i rozmiarów implantów, (III) dobór parametrów selektywnego topienia

wiązką laserową, (IV) wytwarzanie struktur komórkowych i modyfikowanie ich warstwy wierzchniej, oraz (V) badania biogodności.

Wykonano analizy porównawcze możliwości technologicznych procesów SLM i EBM. Przeprowadzono badania mikroskopowe i właściwości mechanicznych wydrukowanego czystego tytanu. Wytworzono w procesie SLM tytanowe próbki lite o małej anizotropii właściwości mechanicznych determinowanej gradientem porowatości zamkniętej uzyskanej w procesie stapiania oraz o właściwościach mechanicznych zbliżonych do stopu Ti-6Al-4V. Wytworzono implanty o strukturze komórkowej o rozmiarach porów $< 150 \mu\text{m}$. Opracowano także proces polerowania chemicznego wytworzonych implantów w mieszaninie kwasów HF/HNO₃ w celu usunięcia z ich powierzchni nieprzetopionych w pełni cząstek proszku. Określono, że Moduł Younga wytworzonych struktur jest zbliżony do modułu kości. Przeprowadzone następnie wstępne badania biogodności wykazały, że wytworzone materiały zarówno nietrawione jak i trawione sprzyjają adhezji i proliferacji komórek macierzystych.

Analiza uzyskanych wyników badań wskazuje na możliwość wprowadzenia procesów przyrostowych selektywnego stapiania laserowego do wytwarzania implantów tytanowych o budowie komórkowej oraz o sztywności i architekturze wewnętrznej zbliżonej do budowy kości. Stwierdzono także możliwość wytwarzania w procesie SLM implantów z tytanu Grade 1 o właściwościach mechanicznych zbliżonych do stopu Ti-6Al-4V (Grade 5). Jest to szczególnie istotne ze względów medycznych, ponieważ występuje możliwość zastąpienia stopów tytanu zawierających często toksyczne dodatki w postaci wanadu i aluminium (Ti-6Al-4V), w pełni biogodnym, technicznie czystym tytanem (Grade 1).

Słowa kluczowe: tytan, Ti-6Al-4V, druk 3D, selektywne topienie laserowe, struktury komórkowe, materiały porowate, wytrzymałość mechaniczna, biogodność

Promotor: Dr hab. inż. Wojciech Świąszkowski, prof. PW

Doktorant: mgr. inż. Bartłomiej Wysocki