

# ZESZYTY STUDENCKICH KÓŁ NAUKOWYCH

## Mikrostruktura i własności mechaniczne tytanowych struktur komórkowych wykonanych techniką SLM

T. Bieg<sup>a</sup>, M. Król<sup>b</sup>

<sup>a</sup> – Student Politechniki Śląskiej, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, e-mail: laufe333@gmail.com

<sup>b</sup> - Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska e-mail: mariusz.krol@polsl.pl

### Streszczenie:

Celem pracy było zaprojektowanie i wytworzenie tytanowych modeli komórkowych techniką SLM z zachowaniem wysokich własności wytrzymałościowych tj. odporności na ściskanie oraz wykonanie symulacji numerycznej i porównanie modeli rzeczywistych z modelami cyfrowymi pod względem odwzorowania wymiarów.

### Abstract:

The aim of the study was to design and fabrication of titanium cellular lattice structures manufactured by SLM with maintaining high mechanical properties, i.e. compression resistance and performance of numerical simulation and comparison of real with digital models in terms of dimensions.

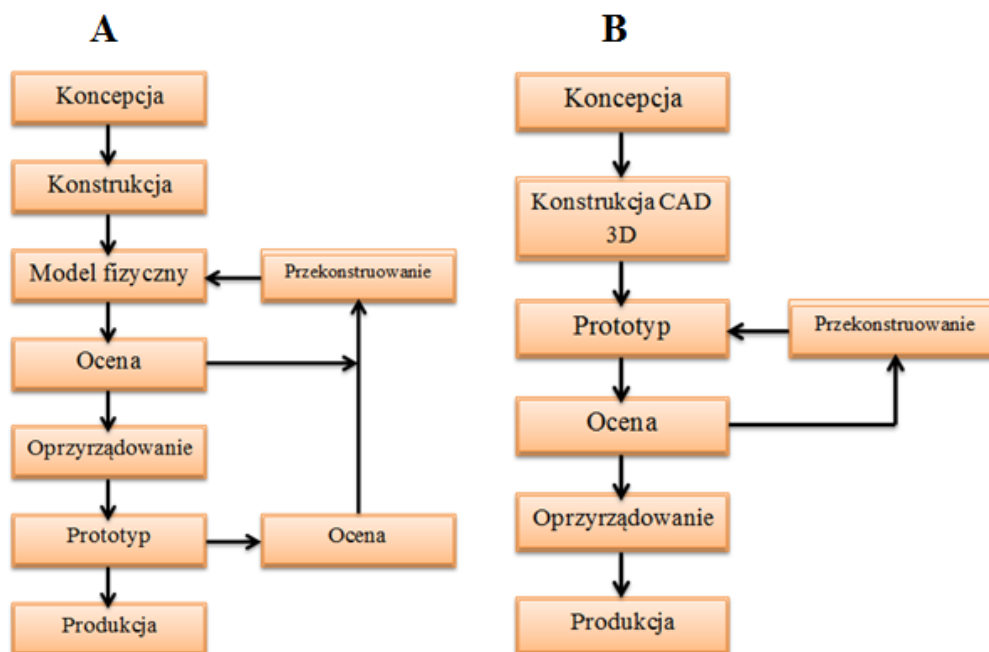
**Keywords:** modele komórkowe, SLM, tytan, wytrzymałość na ściskanie, projektowanie

## 1. WSTĘP

W ciągu ostatniej dekady poczyniono znaczny postęp w dziedzinie rozwoju nowych i zaawansowanych technik wytwarzania przyrostowego (ang. Additive Manufacturing) [1]. W tradycyjnych metodach obróbki elementy są kształtowane poprzez ubytek materiału z prefabrykatu. Dzięki tym technikom otrzymujemy element mniejszy od materiału wejściowego oraz odpady. Do tych procesów należą metody takie jak: toczenie, szlifowanie, frezowanie, obróbka elektroerozyjna, wiercenie. Zupełnie odmienne podejście realizowane jest w metodach addytywnych. Techniki addytywne to proces tworzenia trójwymiarowych obiektów fizycznych warstwa po warstwie bezpośrednio z modeli komputerowych, które są wykonywane w oprogramowaniu CAD (ang. Computer Aided Design). Model 3D jest dzielony na szereg warstw, które są następnie odtwarzane w urządzeniu [2]. Techniki

przyrostowe są również określane, jako metody szybkiego prototypowania (ang. Rapid Prototyping) [3].

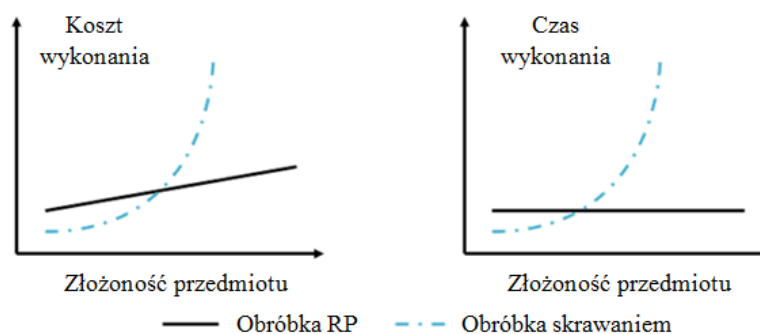
Techniki bazują na modelach komputerowych CAD 3D bez użycia form i narzędzi [4]. Główną zaletą tych technik w porównaniu do konwencjonalnych metod jest znaczne skrócenie procesu przygotowania i wykonania modelu, prototypu czy finalnego produktu oraz łatwość modyfikacji w fazie rozwoju, co przedstawia rysunek 1 [6].



Rysunek 1. Proces przygotowania i wykonania modelu w tradycyjny sposób (a) oraz z wykorzystaniem metod RP (b) [5]

Figure 1. The process of preparation and production of the model: a) in the traditional way, b) using RP [5]

Dzięki zastosowaniu metod Rapid Prototyping i Rapid Tooling można wytwarzać przedmioty o bardzo skomplikowanych kształtach wewnętrznych, których wykonanie w sposób ubytkowy byłoby drogie, kłopotliwe lub nawet niemożliwe. Rysunek 2 przedstawia porównanie czasu i kosztów wytwarzania modeli metodą RP oraz obróbki skrawaniem [6].



Rysunek 2. Porównanie kosztów i czasu wytwarzania modeli metodą RP i obróbki skrawaniem [6]

Figure 2. Comparison of cost and the development time of models fabricated by RP and machining [6]

Należy jednak pamiętać, że techniki te są zdecydowanie krócej stosowane niż konwencjonalne techniki kształtowania i rozwój ich jest bardzo dynamiczny. Dokładność i jakość powierzchni wytwarzanych elementów się zwiększa oraz zwiększa się gama dostępnych materiałów wejściowych [2].

## 2. MATERIAŁY I METODYKA BADAŃ

Celem pracy było dokonanie optymalizacji modeli komórkowych w celu zmniejszenia masy całkowitej gotowego komponentu przy zachowaniu zbliżonych właściwości wytrzymałościowych w szczególności odporności na ściskanie, wykonanie ich techniką SLM oraz określenie własności mechanicznych.

W tym celu zaprojektowano i zoptymalizowano modele komórkowe, których wielkość wynosiła 10x10x10mm, a w następnym etapie poddano weryfikacji numerycznej z wykorzystaniem oprogramowania SolidWorks.

Do wykonania modeli wykorzystano 2 rodzaje proszków tj. czysty proszek tytanu, oraz stop Ti6Al4V. Wielkość ziaren proszku wg producenta firmę Renishaw, mieściła się w zakresie od 10–45  $\mu\text{m}$ . W tabelicy 1 przedstawiono składy chemiczne wykorzystanych proszków tytanu do budowy modeli.

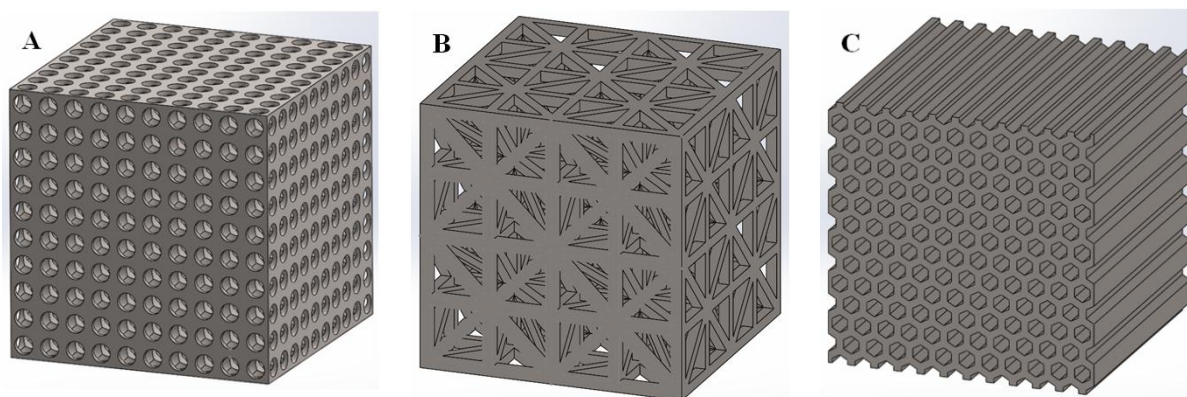
Tablica 1. Skład chemiczny zastosowanych materiałów [%]

Table 1. Chemical composition of materials [%]

	C	Fe	H	N	O	Al	V	Inne	Ti
Ti (grade 2)	<0,1	<0,3	<0,015	<0,03	<0,25	-	-	<0,3	reszta
Ti6Al4V (grade5)	<0,1	<0,3	<0,015	<0,05	<0,2	5,5-6,75	3,5-4,5	<0,4	reszta

Na rysunku 3 przedstawiono zoptymalizowane modele komputerowe, które zostały zaprojektowane w środowisku CAD. Głównymi parametrami, które wzięto pod uwagę przy

projektowaniu były jak najmniejsza całkowita masa modelu oraz relatywnie duża wytrzymałość na ściskanie.



Rysunek 3. Projekt komórek  
Figure 3. The design of cells

Optymalizacji dokonano na podstawie symulacji komputerowej ściskania w oparciu o moduł SolidWorks Simulation przy założonych parametrach:

- komórki typu A
  - dla modelu wykonanego z czystego Ti przyłożona siła wynosiła 9500 N,
  - dla modelu wykonanego ze stopu Ti6Al4V przyłożona siła wynosiła 11500 N.
- komórki typu B:
  - dla modelu wykonanego z czystego Ti przyłożona siła wynosiła 1250 N,
  - dla modelu wykonanego ze stopu Ti6Al4V przyłożona siła wynosiła 1550 N.
- komórki typu C:
  - dla modelu wykonanego z czystego Ti przyłożona siła wynosiła 48100 N,
  - dla modelu wykonanego ze stopu Ti6Al4V przyłożona siła wynosiła 55000 N.

Modele w postaci pliku *stl* zaimportowano do AutoFab, gdzie poddano sprawdzeniu geometrii. Po pozytywnym sprawdzeniu, czy geometria nie zawiera żadnych błędów, czyli sprawdzeniu ciągłości modeli w całej przestrzeni, czy model nie zawiera żadnych szczelin oraz nie posiada żadnych błędnych krawędzi. Następnie opracowane modele zorientowano w przestrzeni roboczej, dodano podpory oraz poddano procesowi podziału na warstwy. Kolejnym krokiem był export tak przygotowanych plików do urządzenia i ich wydrukowanie.

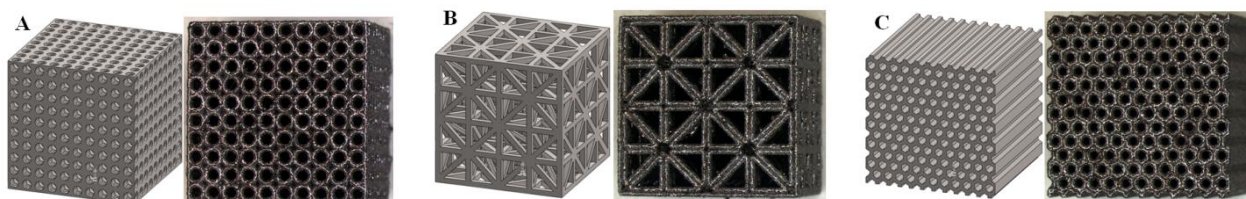
Parametry procesu SLM zastosowane do wytworzenia modeli ustalono eksperymentalnie i wynosiły:

- moc lasera – 85 W,
- wielkość plamki – 100  $\mu\text{m}$ ,
- prędkość skanowania – 300 mm/s,
- grubość warstwy 30  $\mu\text{m}$ ,
- punktowy czas przetapiania 185  $\mu\text{s}$ .

### 3. WYNIKI BADAŃ

W celu zmniejszenia wagi komórek przy zachowaniu relatywnie dużej odporności na ściskanie, dokonano optymalizacji modeli i wybrano do badania trzy typy komórek, (rys. 4).

W tabelicy 2 zestawiono wagę komórek zaprojektowanych w programie SolidWorks, jak również modeli fizycznych wytworzonych metodą SLM, natomiast na rysunku 5 przedstawiono wykres otrzymanych wyników.



Rysunek 4. Widok modelu cyfrowego i odpowiadający mu model rzeczywisty

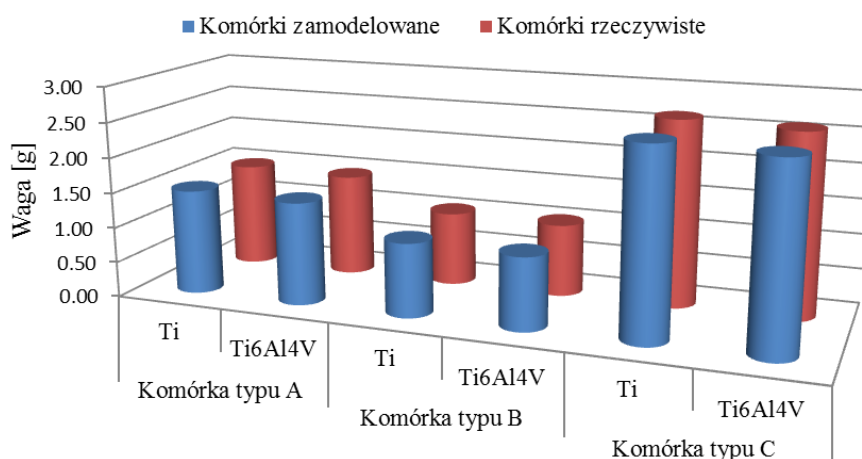
Figure 4. Digital and real view of designed models

Jak wynika z wykonanych badań, waga wytworzonych komórek jest większa niż tych zaprojektowanych w środowisku CAD. Największą różnicą w wadze charakteryzują się komórki typu B, gdzie różnica wyniosła nawet 15 %, natomiast najmniejsza różnica wyniosła dla komórek typu C – ok. 6%. Powodem takiej sytuacji jest różnica wymiarowa, ponieważ modele fizyczne posiadają większe wymiary niż zaprojektowane, a co za tym idzie zostało użyte więcej materiału do wytworzenia komórek. Przyczyną wzrostu wagi wykonanych modeli może być strefa wpływu ciepła, która rozchodziła się na większy obszar, co spowodowało adhezję otaczającego proszku metalu do wykonywanego modelu. Na różnice w wadze komórek mogły również wpłynąć mikropory wytworzonych komórek.

Tablica 2. Waga wytworzonych komórek

Table 2. Total weight of fabricated cellular lattice structures

		Model cyfrowy [g]	Model rzeczywisty [g]
Komórka typu A	Ti	1,49	1,67
	Ti6Al4V	1,46	1,74
Komórka typu B	Ti	1,05	1,20
	Ti6Al4V	1,03	1,22
Komórka typu C	Ti	2,65	2,83
	Ti6Al4V	2,6	2,78



Rysunek 5. Porównanie wagi wytworzonych komórek

Figure 5. Comparison of weight of fabricated cellular lattice structures

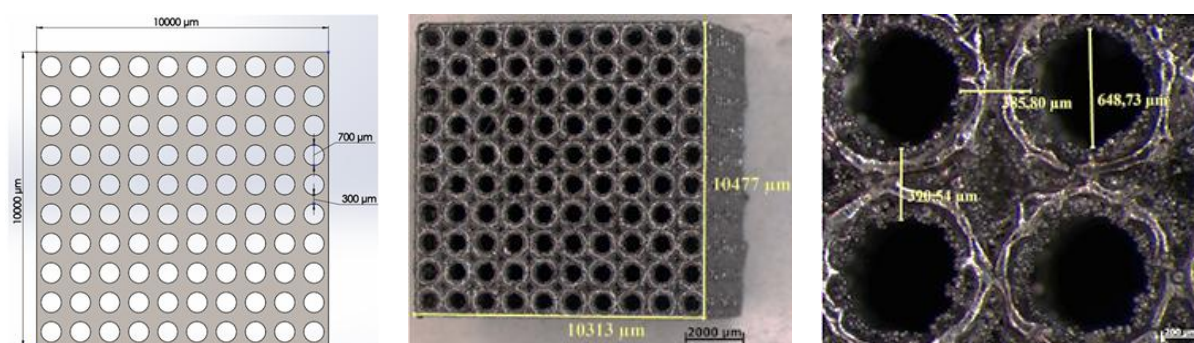
Weryfikacji modeli fizycznych wykonano z wykorzystaniem mikroskopu świetlnego firmy Zeiss SteREO, w celu sprawdzenia odwzorowania wymiarów rzeczywistych wytworzonych komórek. Na rysunkach 6–8 przedstawiono zaprojektowane i wytworzone modele z wykonanymi pomiarami, które zostały zdefiniowane w programie SolidWorks oraz zwymiarowane modele rzeczywiste. Na podstawie weryfikacji można zauważyć, że wymiary modeli zaprojektowanych różnią się od wymiarów modeli fizycznych, modele fizyczne są większe od modeli cyfrowych wykonanych w SolidWorks. Jednym z powodów może być mały obszar skanowania przy każdej warstwie. Innym powodem mogła być temperatura wytworzona przez laser, która przetopiała większy obszar i została przetopiona większa ilość proszku, który pogrubiał ścianki modelu [7].

Dla komórki typu A modele rzeczywiste wytworzone z czystego tytanu są większe o ok. 450  $\mu\text{m}$  przy wielkości całej komórki, a dla grubości pojedynczych ścian jest większa o ok. 90  $\mu\text{m}$  w porównaniu do modeli cyfrowych. W przypadku komórek wykonanych z stopu tytanu Ti6Al4V cały model rzeczywisty jest większy o ok. 440  $\mu\text{m}$ , a szerokość pojedynczych ścian jest większa o ok. 90  $\mu\text{m}$  od zaprojektowanego modelu (rysunek 6).

Sytuacja dla komórek typu B jest podobna, a mianowicie modele fizyczne wykonane z czystego tytanu są większe o nawet 600  $\mu\text{m}$  dla całej komórki a pojedyncze ścianki są grubsze o ok. 145  $\mu\text{m}$ . Dla komórek wykonanych z stopu Ti6Al4V modele rzeczywiste są większe również o ponad 600  $\mu\text{m}$ , a grubość ścianek jest większa o ok. 140  $\mu\text{m}$  w porównaniu do modeli cyfrowych.

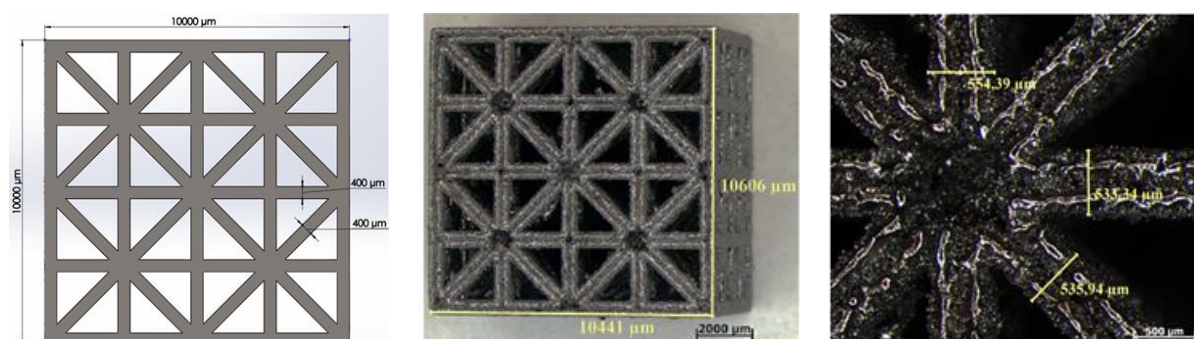
Różnice dla komórki typu B dla modeli fizycznych wytworzonych z czystego tytanu wynoszą przy wielkości całej komórki nawet ponad 600  $\mu\text{m}$ , a dla grubości pojedynczych ścian wynoszą ok. 145  $\mu\text{m}$ . W przypadku modeli fizycznych wykonanych z stopu Ti6Al4V różnice dla całej komórki sięgają również ponad 600  $\mu\text{m}$ , a dla grubości pojedynczych ścian wynoszą ok. 140  $\mu\text{m}$  (rysunek 7).

W przypadku komórek typu C model fizyczny wykonanych z czystego tytanu przy wielkości całej komórki jest większy od modelu cyfrowego o ponad 500  $\mu\text{m}$ , a dla grubości pojedynczych ścian jest większy o ok. 100  $\mu\text{m}$ , natomiast w przypadku modeli wykonanych z stopu Ti6Al4V model rzeczywisty jest większy o 450  $\mu\text{m}$  dla wielkości całej komórki, oraz o ok. 100  $\mu\text{m}$  dla grubości pojedynczych ścian (rysunek 8).



Rysunek 6. Porównanie wymiarów modelu cyfrowego z modelem rzeczywistym komórki typu A wykonanej ze stopu Ti6Al4V

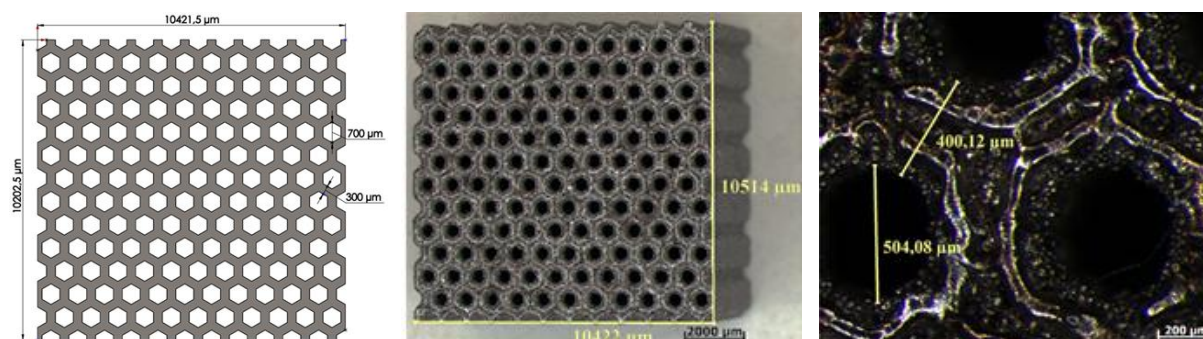
Figure 6. Comparison the dimensions of digital and real model, cell type A made of Ti6Al4V



Rysunek 7. Porównanie wymiarów modelu cyfrowego z modelem rzeczywistym komórki typu B wykonanej ze stopu Ti6Al4V

Figure 7. Comparison the dimensions of digital and real model, cell type B made of Ti6Al4V

Podczas symulacji numerycznej brano pod uwagę tylko naprężenia von Mises-a. Na podstawie wyników z symulacji SolidWorks największe naprężenia występują w komórce typu A wykonanej z stopu Ti6Al4V, natomiast najmniejsze występują w komórce typu B wykonanej z czystego tytanu. Wyniki przedstawiono w tabelicy 3 oraz na rysunku 9.



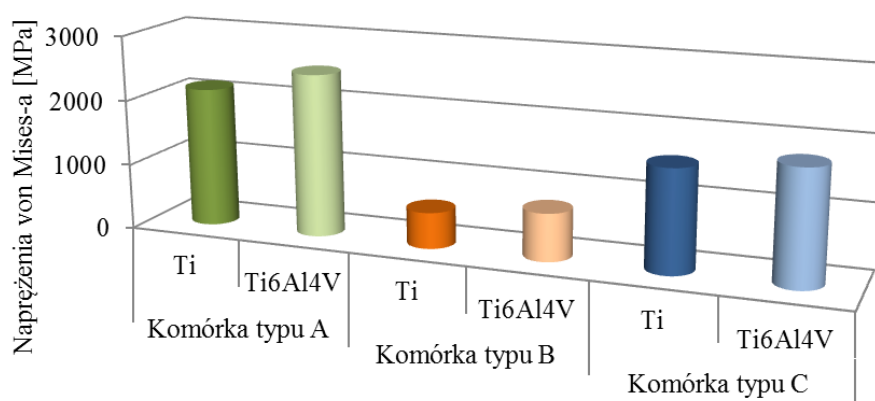
Rysunek 8. Porównanie wymiarów modelu cyfrowego z modelem rzeczywistym komórki typu B wykonanej ze stopu Ti6Al4V

Figure 8. Comparison the dimensions of digital and real model, cell type C made of Ti6Al4V

Tablica 3 Wyniki naprężenia badanych komórek

Table 3. Results of strain of analysed cellular lattice structures

		Naprężenia (von Mises) [MPa]
Komórka typu A	Ti	2136,9
	Ti6Al4V	2498,3
Komórka typu B	Ti	553,4
	Ti6Al4V	730,5
Komórka typu C	Ti	1576,6
	Ti6Al4V	1755,2

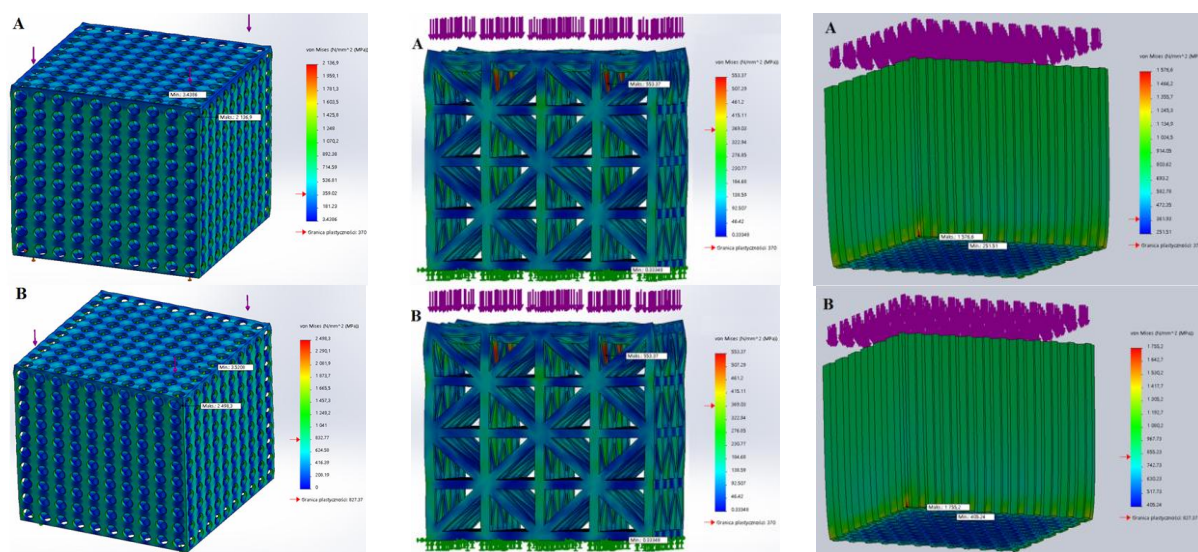


Rysunek 9. Zestawienie wyznaczonych naprężeń analizowanych komórek

Figure 9. A summary of designated strain of analysed cellular lattice structures

Na rysunku 10 przedstawiono wyniki z symulacji komputerowej przedstawiającej rozkład naprężeń w modelu oraz miejsca, gdzie występują najmniejsze oraz największe naprężenia ściskające. W przypadku każdego modelu największe naprężenia powstają na zaokrąglonych narożach. Na podstawie otrzymanych wyników można wywnioskować, że zaokrąglenie narożników i usunięcie ostrych kątów spowoduje zmniejszenie występowanie znacznych naprężeń w tych miejscach i zarazem zwiększenie wytrzymałości całego modelu.





Rysunek 10. Rozkład naprężeń dla analizowanych komórek wykonanych: a) Ti, b) Ti6Al4V  
 Figure 10. The stress distribution of cellular lattice structures made of: a) Ti b) Ti6Al4V

W celu określenia własności mechanicznych wyznaczono wytrzymałość na ściskanie opracowanych modeli oraz modeli cyfrowych. W tabelicy 4 przedstawiono porównanie wyników wytrzymałości na ściskanie, natomiast w tabelicy 5 przedstawiono odkształcenie badanych modeli komputerowych i rzeczywistych.

Tabela 4. Wytrzymałości na ściskanie analizowanych modeli  
 Table 4. Compressive strength of the analysed models

		Maksymalna siła na ściskanie [N]	
Komórka typu A	Ti		9499,0
	Ti6Al4V		11574,9
Komórka typu B	Ti		1282,7
	Ti6Al4V		1559,4
Komórka typu C	Ti		48136,5
	Ti6Al4V		54971,7

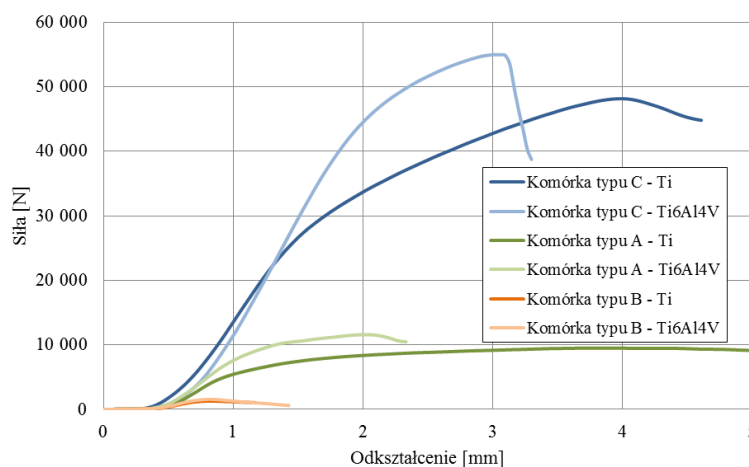
Tabela 5. Odkształcenie badanych komórek  
 Table 5. The deformation of the analysed models

		Odkształcenie [mm]	
Komórka typu A	Ti		3,90
	Ti6Al4V		2,0
Komórka typu B	Ti		0,84
	Ti6Al4V		0,83
Komórka typu C	Ti		4,0
	Ti6Al4V		3,03

Na podstawie badań wytrzymałości na ściskanie stwierdzono, że największa siła przy wytrzymałości na ściskanie komórki typu A wykonanej z czystego Ti wynosi 9499,02 N. Dla porównania dla tego samego typu komórki wykonanej ze stopu Ti6Al4V wytrzymałość wzrosła z ok. 9499,02 N do ok. 11574,91 N, co przedstawiono na wykresie (rys. 11).

Analogiczną sytuację stwierdzono dla komórek typu B, gdzie próbki wykonane z czystego tytanu charakteryzowały się wytrzymałością na ściskanie na poziomie 1282,66 N, a te same modele wykonane ze stopu charakteryzowały się wytrzymałością na poziomie ok. 1559,43 N (rys. 11).

Dla komórek typu C sytuacja jest identyczna, a mianowicie komórki wykonane z czystego tytanu charakteryzowały się wytrzymałością w granicy 48136,48 [N], natomiast komórki wykonane z stopu Ti6Al4V charakteryzowały się wytrzymałością na poziomie 54791,67 N (rys. 11).

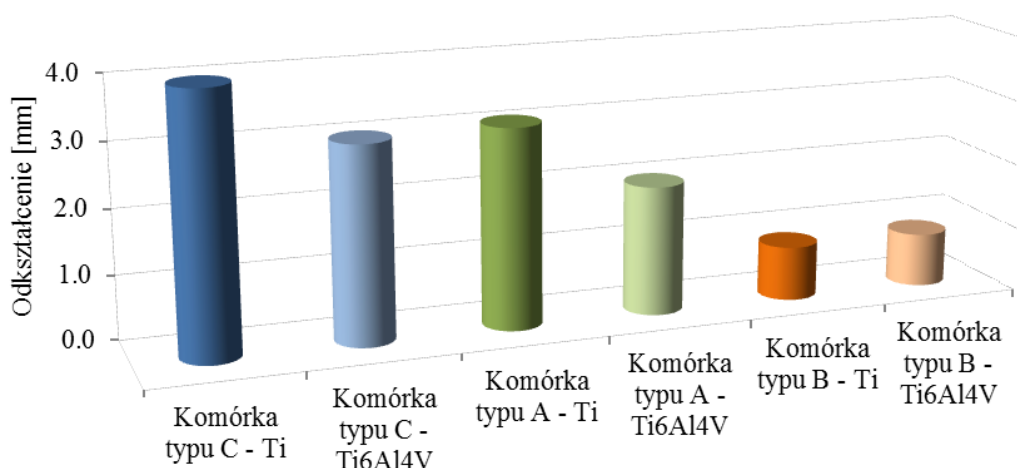


Rysunek 11. Zestawienie wyników wytrzymałości na ściskanie analizowanych modeli

*Figure 11. A summary of results of the compressive strength of analysed cellular lattice structures*

Dla opracowanych modeli fizycznych największą wytrzymałością na ściskanie charakteryzował się model typu C wykonany ze stopu Ti6Al4V, a najmniejszą model komórki typu B wykonany z czystego tytanu. Jest to spowodowane tym, że komórka typu C posiada największą wagę i jest najbardziej zagęszczona, natomiast komórka typu B jest najlżejsza spośród wszystkich komórek biorących udział w badaniu.

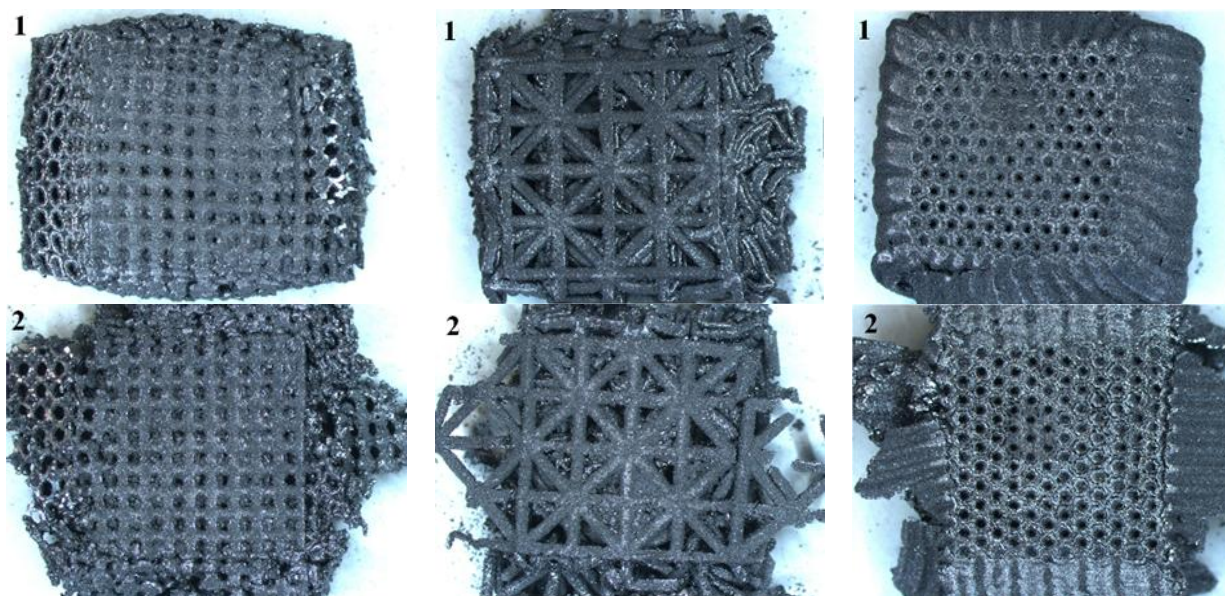
Na rysunkach 12 przedstawiono zestawienie wyników odkształcenia badanych modeli komórek.



Rysunek 12. Zestawienie wyników odkształcenia badanych modeli komórek

*Figure 12. A summary of results of deformation models of analysed cellular lattice structures*

Po badaniu statycznej próby ściskania modele wykonane z czystego tytanu dalej stanowiły jedną całość, odkształciły się jedynie plastycznie, natomiast modele wykonane z stopu Ti6Al4V po próbie ściskania wykazywały się znacznie większą zdolnością do łamania i kruszenia. Porównanie badanych modeli po statycznej próbie ściskania przedstawiono na rysunku 13.



Rysunek 13. Analizowane modele komórkowe po badaniu wytrzymałości na ściskanie (1 – Ti, 2 – Ti6Al4V)

*Figure 13. Analysed cellular lattice structures after compression strength test made by 1-Ti and 2-Ti6Al4V*

#### 4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W artykule przedstawiono proces optymalizacji zaprojektowanych modeli komórek w celu zmniejszenia masy całkowitej gotowego wyrobu przy zachowaniu wysokich własności wytrzymałościowych w szczególności odporności na ściskanie oraz wykonanie ich techniką SLM oraz wykonania symulacji numerycznej.

Wykorzystując mikroskop świetlny możliwe było określenie wielkości komórek elementarnych oraz grubości poszczególnych ścianek. Stwierdzono, że modele rzeczywiste były większe od modeli cyfrowych. Powodem była strefa wpływu ciepła, która podczas przetapiania laserem rozchodziła się na większy obszar, co spowodowało adhezję większej ilości proszku. Na wagę mogło wpłynąć również powstawanie mikroporów. Strefa wpływu ciepła podczas przetapiania proszku miała wpływ również na różnice wymiarowe, ponieważ komórki rzeczywiste charakteryzowały się większymi wymiarami niż te zaprojektowane w środowisku CAD.

Dzięki symulacji numerycznej możliwe było przedstawienie naprężeń, jakie występują podczas procesu ściskania oraz w których miejscach występują największe, jak również najmniejsze naprężenia. Jak wynikało z badań zaokrąglenie narożników i usunięcie ostrych kątów może spowodować zmniejszenie naprężeń w tych miejscach i zarazem zwiększenie wytrzymałości całego modelu.

Na podstawie statycznej próby ściskania można zauważyć, że modele wykonane ze stopu Ti6Al4V charakteryzowały się większą wytrzymałością na ściskanie niż modele wykonane z czystego tytanu. Natomiast badania struktury po statycznej próbie ściskania przedstawiają, że komórki wykonane z czystego tytanu są dużo bardziej plastyczne niż te wykonane ze stopu, które po badaniu charakteryzowały się zdolnością do kruszenia i łamania. Największą wytrzymałością na ściskanie charakteryzowała się komórka typu C wykonana ze stopu Ti6Al4V, jednakże charakteryzowała się największą masą całkowitą.

#### LITERATURA

1. Ch. Yan Hussein, Preliminary investigation on cellular support structures using SLM process, *Innovative Developments in Virtual and Physical Prototyping*, 92 (2011) 609-612.
2. <http://e-technolog.pl> dostęp dnia 07.01.2015
3. <http://en.calameo.com/> dostęp dnia 20.01.2015
4. F. Górski, R. Wichniarek, Symulacja procesów wytwarzania przyrostowego z wykorzystaniem środowiska wirtualnego, *Postęp nauki i techniki* 7, 2011.
5. M. Miecielica, Techniki szybkiego prototypowania - Rapid Prototyping Przegląd Mechaniczny, 02/2010, 39-45.
6. E. Chlebus, *Innowacyjne technologie rapid prototyping – rapid tooling w rozwoju produktu*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003.
7. D. Wang, Y. Yang, Study on the Designing Rules and Processability of Porous Structure Based on Selective Laser Melting (SLM), *Journal of Materials Processing Technology*, 213/10 (2013) 1734–1742.