



Własności mechaniczne struktur komórkowych wytwarzanych techniką SLM

Ł. Wojtala^a, M. Król^b, T. Tański^c

^a – Student Politechniki Śląskiej, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska,
e-mail: lukaszwojtala1@live.com

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

^c - Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska
e-mail: tomasz.tanski@polsl.pl

Streszczenie:

Celem pracy było zbadanie zaprojektowanych struktur porowatych pod kątem ich mikrostruktury oraz wytrzymałości na ściskanie w zależności od ich właściwości fizycznych.

Abstract:

The aim of the study was to investigate cell structures designed for their microstructure and compressive strength as a function of their mass.

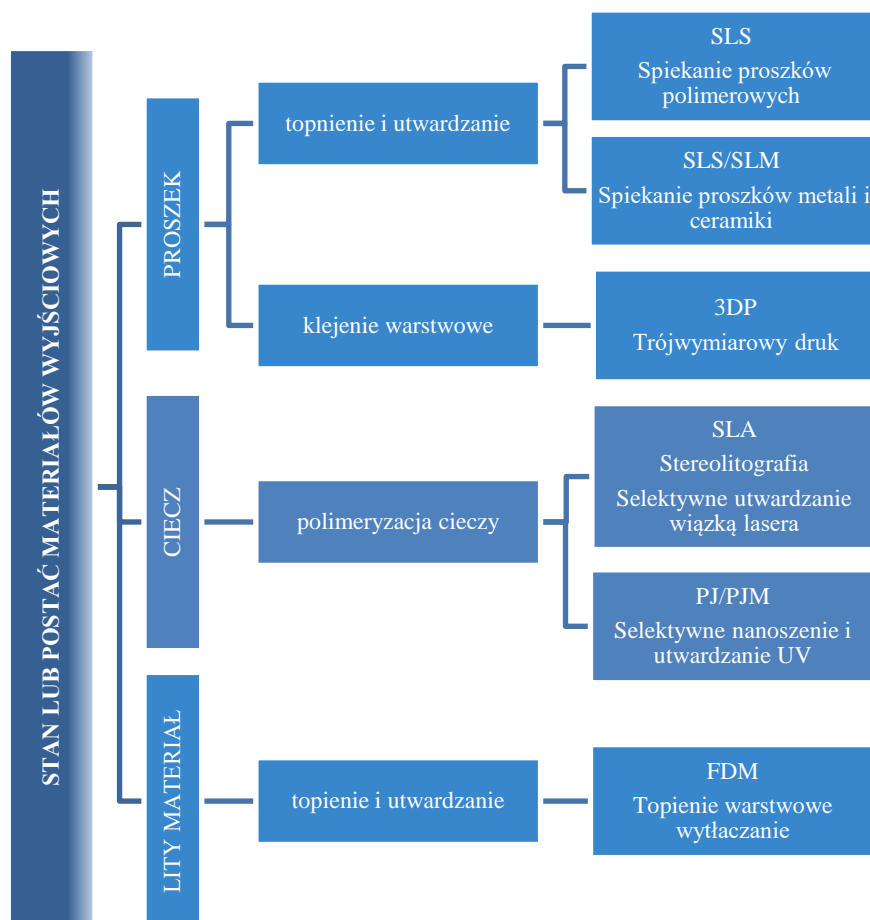
Keywords: modele komórkowe, struktury porowate, SLM, tytan, wytrzymałość na ściskanie, projektowanie, symulacja numeryczna

1. WSTĘP

Wytwarzanie przyrostowe AM (ang. Additive Manufacturing) jest wciąż nowym i nadal poznawanym rozwiązaniem produkcyjnym, który w najbliższym czasie stanie się alternatywą dla tradycyjnych technik produkcyjnych.

Aktualnie wszystkie technologie związane z AM dążą do wytwarzania przedmiotów długookresowego przeznaczenia. Ze względu zastosowanie uzyskanych przedmiotów wytwarzanie przyrostowe podzielić można na dwie grupy: szybkiego wytwarzania produkcyjnego RM (ang. Rapid Manufacturing), które skupia się na produkcji spójnych elementów o trudnym kształcie (np. implanty medyczne) oraz szybkiego wytwarzania narzędzi RT (ang. Rapid Tooling) zajmującego się wytwarzaniem narzędzi wytwórczych (np. matryce wtryskowe do polimerów).

Metody te można podzielić ze względu na stan skupienia materiałów wykorzystywanych do wykonania procesu (rys. 1) [1].



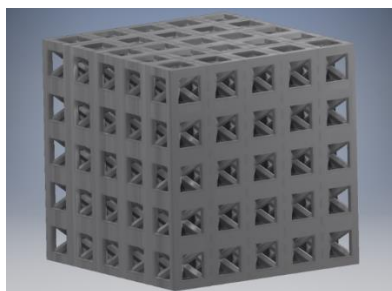
Rysunek 1. Podział wytwarzania przyrostowego ze względu na stan skupienia materiału wsadowego [2, 3]

Figure 1. The division of additive manufacturing due to the physical state of the feed material [2, 3]

Przyczyną dla jakiej projektuje się i wytwarza struktury porowate jest zmniejszenie wykorzystania materiałów (szczególnie w przypadku mało dostępnych lub drogich materiałów) i zmniejszenie masy gotowego wyrobu. Dodatkowym atutem struktur porowatych kształtów są również: szybkość wytwarzania oraz zmniejszona ilość energii pochłoniętej w trakcie wytwarzania. Takie podejście pozwala korzystnie uzyskać elementy o dobrych właściwościach wytrzymałościowych przy relatywnie niskiej masie, charakteryzujące się dobrym rozłożeniem naprężeń, a nawet wykazujące cechy termo- i akustycznie izolacyjne jako elementy wykorzystywane w przemyśle kosmicznym, medycznym i motoryzacyjnym [4].

Podział struktur porowatych ze względu na kształt [5]:

Mierzalne – powierzchnie tych struktur oparte są na płaszczyznach, krawędziach i punktach styku. Podstawową jednostką takiej struktury jest komórka kratowa. To ona i jej parametry nadają właściwości całej bryły. Tworzona jest zwykle przy pomocy regularnych lub foremnych elementów (rys. 2) [6].



Rysunek 2. Przykładowa struktura mierzalna z widocznymi komórkami kratowymi
Figure 2. An example of a measurable structure with visible lattice cells

Aby ułatwić pracę nad charakterystyką i dalszym wykorzystaniem tych struktur, przy projektowaniu komórek określa się ich standardowe parametry. Podstawowymi współczynnikami, jakie się określa dla komórek to [6]:

- gęstość względna:

$$\rho = \frac{V_{kom}}{V} \quad (1)$$

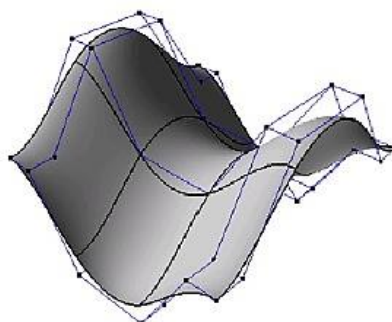
gdzie V_{kom} - objętość struktury, V – objętość komórki;

- współczynnik gęstości powierzchni:

$$\beta = \frac{S_{kom}}{V_{kom}} \quad (2)$$

gdzie S_{kom} – powierzchnia struktury komórki, V_{kom} – objętość struktury.

Struktury parametryczne – są to struktury, w których punkty, w przeciwieństwie do struktur mierzalnych, nie leżą na płaszczyźnie. Są one wyłącznie zmiennymi funkcji parametrycznej służącymi określeniu krzywej, jaka w danym miejscu biegnie po płaszczyźnie. Najczęściej wykorzystywane są: krzywe Gaussa, krzywe Fouriera lub krzywe NURBS (rys. 3) [5, 7].



Rysunek 3. Krzywe NURBS tworzące powierzchnię [7]

Figure 3. Krzywe NURBS tworzące powierzchnię [7]

Funkcyjne – powierzchnia takiej struktury jest odwzorowaniem zaprojektowanego wzoru funkcji wymiernej trzeciego stopnia w każdym z trzech kierunków. Funkcja ta zdefiniowana jest zbiorem punktów p , które muszą spełniać zależność $p \in \mathbb{R}^3$ oraz poniższe równanie [5]:

$$f(x, y, z) = 0 \quad , \text{ gdzie } f: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}. \quad (3)$$

2. MATERIAŁY I METODYKA BADAŃ

Celem pracy było porównanie zaprojektowanych struktur komórkowych wykonanych ze stopu tytanu Ti6Al4V, pod kątem własności wytrzymałościowych oraz wskaźników charakteryzujących strukturę komórkową (ρ , β) i ich własności fizycznych. Badania własne wykazały również zbieżność wyników symulacji numerycznej ze statyczną próbą ściskania oraz problemy związane z obliczaniem naprężeń w przypadku struktur komórkowych.

W założeniach projektowych bryły zamodelowane miały mierzyć 10x10x10 mm. Założono, że najmniejszy detal struktury nie może wynieść mniej niż 0,4 mm. Podczas symulacji naprężeniowej wykorzystano siłę ściskającą $F = 10\ 000\text{N}$.

Wszystkie zaprojektowane modele wykonano ze stopu tytanu Ti6Al4V. Według dostawcy (Renishaw) nazwa komercyjna proszku to grade 5, którego wielkość proszku mieściła się w granicach 10 - 45 μm . W tabeli 1 przedstawiono ważniejsze własności fizyczno – mechaniczne wykrozsytanego materiału.

Tabela 1. Własności wytrzymałościowe stopu Ti6Al4V [8, 9]

Table 1. The strength properties of the alloy Ti6Al4V [8, 9]

Ti6Al4V		
Gęstość	[g/cm ³]	4,43
Twardość	HV	349
Wytrzymałość na rozciąganie	[MPa]	950
Granica plastyczności	[MPa]	880
Współczynnik sprężystości	[MPa]	113 800
Wytrzymałość względna	[MPa/(g/cm ³)]	240

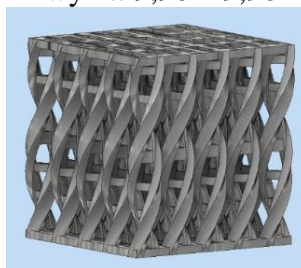
Na podstawie zamodelowanych struktur porowatych oraz ich charakterystyk z oprogramowania SolidWorks, wykonano zestawienie parametrów (masa, S_0 , ρ , β) potrzebnych do następnego etapu badań. Struktury przedstawiono w pozycji, jakiej poddano je próbie ściskania (rys. 4 - 9). Dokładne charakterystyki zaprojektowanych struktur komórkowych charakteryzowały się parametrami:

- DNA:

$$\rho = \frac{196,473}{997,20} = 0,2 \quad \beta = \frac{1544,78}{196,473} = 7,86 \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}^3}$$

$$V_{\text{kom}} = 196,473 \quad \text{masa: } 0,87 \text{ g}$$

$$S_0 = 21,5 \text{ mm}^2 \quad \text{wym.: } 9,98 \times 9,98 \times 10,0 \text{ mm}$$



Rysunek 4. Struktura komórkowa DNA

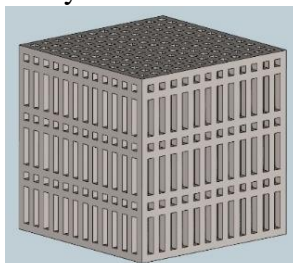
Figure 4. The cell structure of DNA

- Kolumny

$$\rho = \frac{410,18}{1000} = 0,4 \quad \beta = \frac{3456,96}{410,18} = 8,43 \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}^3}$$

$$V_{\text{kom}} = 410,18 \quad \text{masa: } 1,82 \text{ g}$$

$$S_0 = 27,04 \text{ mm}^2 \quad \text{wym.: } 10 \times 10 \times 10 \text{ mm}$$



Rysunek 5. Struktura komórkowa Kolumny

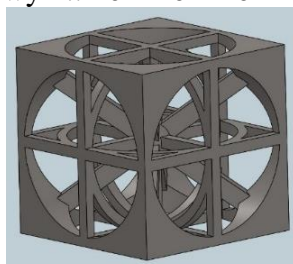
Figure 5. The cell structure of Kolumny

- Klepsydra

$$\rho = \frac{212,21}{1000} = 0,2 \quad \beta = \frac{879,91}{212,21} = 4,15 \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}^3}$$

$$V_{\text{kom}} = 212,21 \quad \text{masa: } 0,94 \text{ g}$$

$$S_0 = 39,92 \text{ mm}^2 \quad \text{wym.: } 10 \times 10 \times 10 \text{ mm}$$



Rysunek 6. Struktura komórkowa Klepsydra

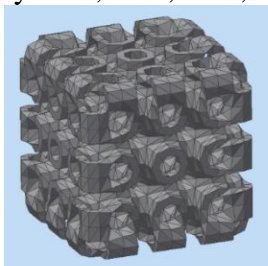
Figure 6. The cell structure of Klepsydra

- Powierzchnia minimalnych naprężeń

$$\rho = \frac{196,473}{997,20} = 0,2 \quad \beta = \frac{1544,78}{196,473} = 7,86 \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}^3}$$

$$V_{\text{kom}} = 196,473 \quad \text{masa: } 0,98 \text{ g}$$

$$S_0 = 17,22 \text{ mm}^2 \quad \text{wym.: } 8,9 \times 8,9 \times 8,9 \text{ mm}$$



Rysunek 7. Struktura komórkowa Powierzchnia minimalnych naprężeń

Figure 7. The cell structure of Powierzchnia minimalnych naprężeń

- Sfera

$$\rho = \frac{202,387}{1000} = 0,2$$

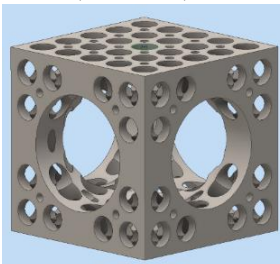
$$\beta = \frac{1312,38}{202,387} = 6,48 \frac{mm^2}{mm^3}$$

$$V_{\text{komb}} = 202,387$$

$$S_0 = 8,64 \text{ mm}^2$$

masa: 0,90 g

wym.: 10,00 x 10,00 x 10,00



Rysunek 8. Struktura komórkowa Sfera

Figure 8. The cell structure of Sfera

- Stelaż

$$\rho = \frac{196,473}{997,20} = 0,2$$

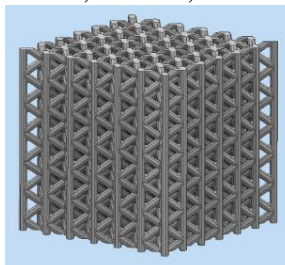
$$\beta = \frac{1544,78}{196,473} = 7,86 \frac{mm^2}{mm^3}$$

$$V_{\text{komb}} = 196,473$$

$$S_0 = 35,93 \text{ mm}^2$$

masa: 1,2 g

wym.: 10,00 x 10,00 x 10,00



Rysunek 9. Struktura komórkowa Stelaż

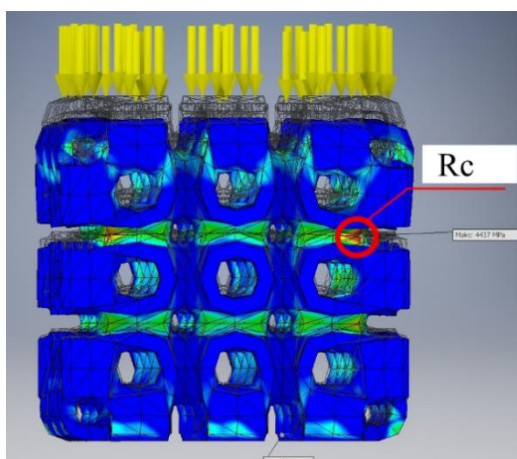
Figure 9. The cell structure of Stelaż

3. PRZEBIEG BADAŃ I WYNIKI

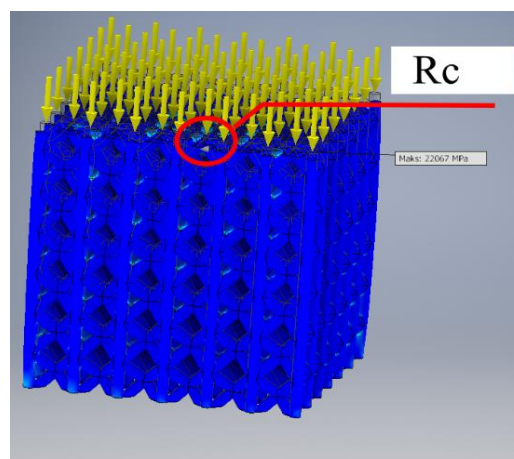
W zależności od wykorzystanego oprogramowania symulacje wytrzymałościowe modeli na ściskanie wykonano w oparciu o oprogramowanie:

- Inventor, modele: DNA, Stelaż, Powierzchnie Minimalnych Naprężeń,
- SolidWorks, modele: Klepsydra, Kolumny.

Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że model **powierzchnia minimalnych naprężeń** może przenieść największe naprężenia ściskające, ponieważ miejsce z maksymalnym naprężeniem, jakie wyznaczono na podstawie symulacji w jego strukturze przy nacisku 10 000N wyniosło tylko 4 437 MPa (rys. 10). Najmniejsze wartości siły ściskającej z kolei może przyjąć model **stelaż** (rys. 11), ponieważ maksymalne naprężenia osiągnęły w strukturze aż 22 067 MPa przy nacisku siłą 10 000N (tab. 2).



Rysunek 10. Symulacja naprężeń w modelu Powierzchnia minimalnych naprężeń
 Figure 10. Simulation of stress in the model Powierzchnia minimalnych naprężeń



Rysunek 11. Symulacja naprężeń w modelu Stelaż
 Figure 11. Simulation of stress in the model Stelaż

Tabela 2. Pomiary największych stwierdzonych naprężeń zasymulowanych na modelach
 Table 2. Measurements of the largest identified stress simulated models

Struktura komórkowa	Stwierdzone maksymalne naprężenia [MPa]
Dna	5 077
Klepsydra	7 178
Kolumny	4 614
Sfera	18 766
Powierzchnia min. napr.	4 437
Stelaż	22 067

Z urządzeniem Renishaw AM 125 sprzężona jest stacja robocza wraz z oprogramowaniem AutoFab, które umożliwiło dodanie podpór oraz podzielenie modelu na warstwy. W tabeli 3 przedstawiono parametry procesu.

Tabela 3. Parametry procesu wytwarzania modeli
 Table 3. Parametry procesu wytwarzania modeli

Moc lasera	150 W
Szybkość skanowania laserem	0,3 m/s
Grubość warstwy	30 μm
Średnica wiązki lasera	200 μm
Gaz ochronny	Argon 4,6
Próżnia	963 bar
Temperatura platformy	150°C

Na podstawie wykonanych pomiarów można stwierdzić, że największą dokładnością wymiarową charakteryzował się model **kolumny** (0,11 mm), a najmniejszą **powierzchnia minimalnych naprężeń** (aż 0,67 mm) (tab. 4). Różnice wymiarowe pomiędzy poszczególnymi modelami mogły wynikać z dokładności samego urządzenia, które wg producenta firmę Renishaw wynosi $\pm 100\mu\text{m}$ dla grubości warstwy $50\mu\text{m}$. W przypadku

powierzchni minimalnych naprężeń należy zwrócić także uwagę na brak krawędzi zewnętrznych, co również mogło wpłynąć negatywnie na jakość pomiaru.

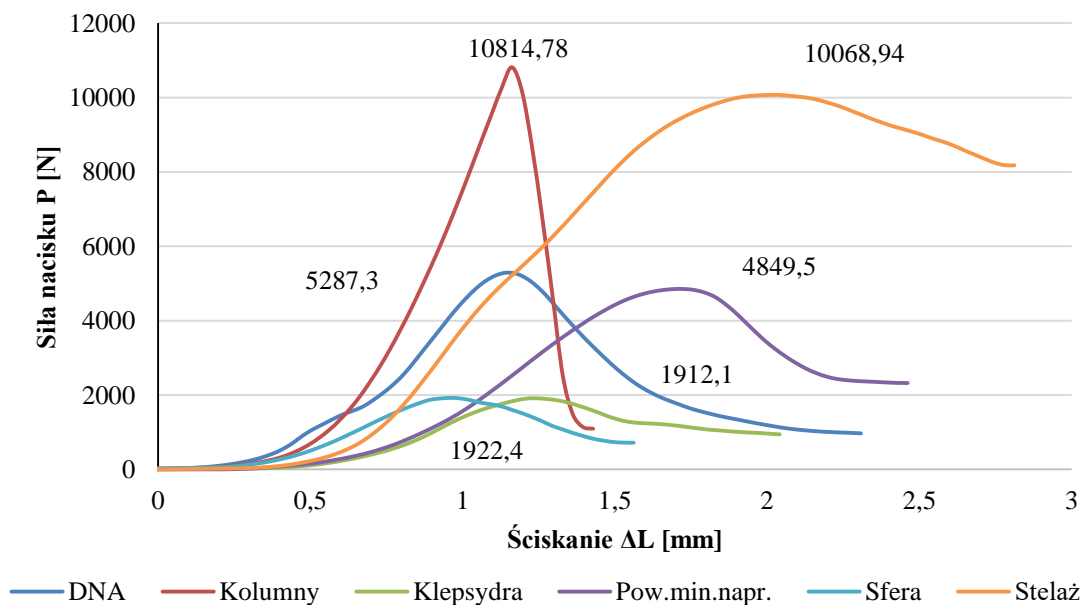
Tabela 4. Zestawienie pomiarów brył z wymiarami zaprojektowanymi

Table 4. Summary measurement of solids with dimensions designed

Struktura komórkowa	Wymiary (w nawiasach wymiary projektowe) [mm]	Największa różnica wymiarowa od założonego
Dna	9,93(9,98) x 9,88(9,98) x 10,16(10,00)	0,16
Kolumny	10,04(10,00) x 9,99(10,00) x 10,11(10,00)	0,11
Klepsydra	10,16(10,00) x 10,16(10,00) x 10,16(10,00)	0,16
Pow. min. napr.	8,9(9,57) x 8,9(9,57) x 8,9(9,57)	0,67
Sfera	10,05(10,00) x 10,11(10,00) x 10,15(10,00)	0,15
Stelaż	10,15(10,00) x 10,19(10,00) x 10,51(10,00)	0,51

Do wykonania statycznej próby na ściskanie badanych struktur, wykorzystano uniwersalną maszynę wytrzymałościową ZWICK Z100. Prędkość ściskania ustalono w oparciu o normę PN-57/H-04320 i wyniosła 100 mm/min.

Na podstawie statycznej próby na ściskanie otrzymano wyniki z zależności siły nacisku F do skrócenia ΔL , których zestawienie ilustruje rysunek 12.



Rysunek 12. Wytrzymałość na ściskanie

Figure 12. Compressive strength

Wartości maksymalnych sił nacisku F_c , przy których próbki ulegały niszczeniu w trakcie badania przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Wartości maksymalnych sił nacisku F_c Table 5. The maximum values of compressive forces F_c

Model	Maksymalna siła ściskania struktury [N]
DNA	5 287,30
Kolumny	10 814,78
Klepsydra	1 912,10
Pow. min. napr.	4 849,50
Sfera	1 922,40
Stelaż	10 068,94

Do obliczeń naprężeń σ niezbędne było wyznaczenie pola przekroju każdej z próbek na połowie wysokości oraz ich rzeczywista wysokość do obliczenia skrócenia względnego A_c (tab. 6).

Tabela 6. Pomiary przekrojów poprzecznych modeli

Table 6 Measurements of cross-sectional models

Próbka	Pole przekroju w połowie długości [mm ²]	Wysokość próbki mierzona w mikroskopie [mm]
DNA	21,5	10,16
Klepsydra	39,92	10,16
Stelaż	35,93	10,51
Kolumny	27,04	10,11
Pow. Min. Nap.	17,22	9,57
Sfera	8,64	10,15

Rysunek 13 przedstawia wykres naprężeń powstałych podczas próby ściskania modeli. Zaznaczono w nich również granicę wytrzymałości na ściskanie R_c .

W tabeli 7 zamieszczone zostały naprężenia obliczone dla struktur komórkowych.

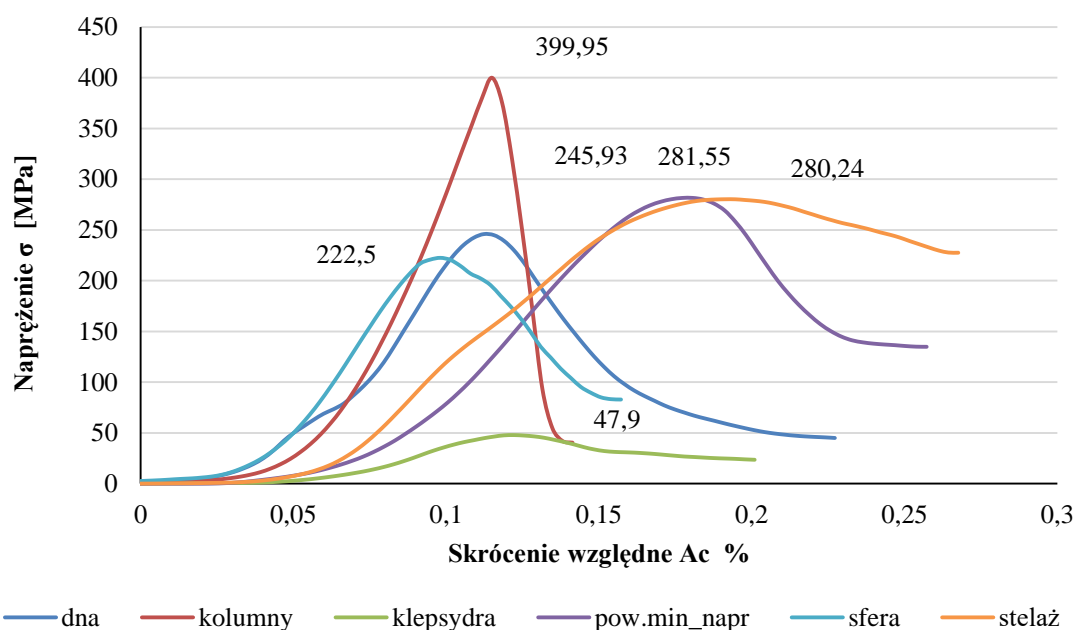
Tabela 7. Maksymalne naprężenia powstałe przy próbie ściskania struktur

Table 7 Maximum stress resulting from the compression test structures

Model	Maksymalne naprężenie zarejestrowane podczas ściskania struktury R_c
DNA	245,93 MPa
Kolumny	399,95 MPa
Klepsydra	47,90 MPa
Pow. min. napr.	281,55 MPa
Sfera	222,50 MPa
Stelaż	280,24 MPa

Na podstawie wykonanych badań wytrzymałości struktur komórkowych na ściskanie można na tym etapie porównać wyniki zasymulowane numerycznie z wynikami rzeczywiste wykonanej próby. W szczególności niekorzystną była symulacja dla bryły **stelaż**, która, ze względu na liczne i drobne elementy, w analizie cyfrowej najszybciej pękała w ich łączeniach. Strukturą o najlepszych własnościach wytrzymałościowych okazała się **kolumny**,

która w symulacji osiągnęła naprężenia nie większe niż 4 614 MPa oraz R_c w badaniu wytrzymałościowym równe 399,95 MPa (tab. 8).



Rysunek 13. Wykres naprężenia σ uzyskanych struktur porowatych
Figure 13. Chart stress σ obtained porous structures



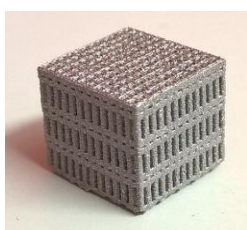
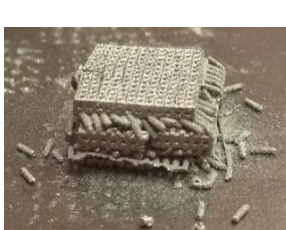





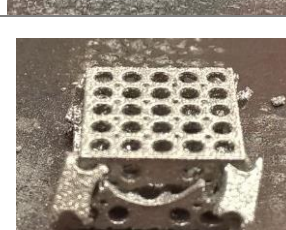
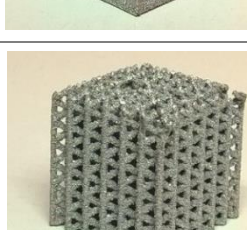
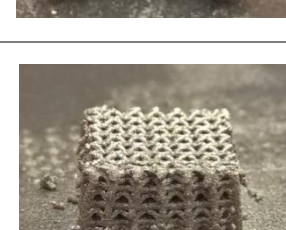
Tabela 8. Porównanie własności wytrzymałościowych struktur pod kątem analizy komputerowej oraz badania wytrzymałościowego
Table 8 Comparison of mechanical properties of structures for computer analysis and endurance test

Zaprojektowana struktura	Wynik maksymalnych naprężeń powstałych w strukturze przy nacisku 10 000N (miejsce w rankingu)	Wynik R_c uzyskany po obliczeniach z badania wytrzymałości na ściskanie (miejsce w rankingu)
DNA	5 077 MPa (III)	245,93 MPa (IV)
Klepsydra	7 178 MPa (IV)	47,90 MPa (VI)
Kolumny	4 614 MPa (II)	399,95 MPa (I)
Pow. min. napr.	4 437 MPa (I)	281,55 MPa (II)
Sfera	18 766 MPa (V)	222,50 MPa (V)
Stelaż	22 067 MPa (VI)	280,24 MPa (III)

W tabeli 9 zamieszczone zostały zdjęcia próbek wykonane przed i po próbie ściskania.

Tabela 9. Rzeczywisty wygląd struktur komórkowych przed i po wykonaniu próby wytrzymałościowej na ściskanie

Table 9 The actual appearance of the cellular structures before and after the compressive strength tests

Model przed próbą		Model po próbie
	DNA	
	Kolumny	
	Sfera	
	Powierzchnie minimalnych naprężeń	
	Sfera	
	Kolumny	

4. WNIOSKI

Wytworzone struktury komórkowe techniką SLM pozwoliły na zachowanie dokładności wymiarowej w granicach nie przekraczających 500 μm . Powodem tego były spieczone ziarna proszku, do ścian na bokach elementów, a w szczególności na powierzchniach pionowych. Wiązka lasera padając na warstwę proszku podgrzewa go do temperatury topnienia i powstaje jezioro stopionego metalu. Jednak, w zależności od przewodności cieplnej materiału, może powodować to w mniejszym lub większym stopniu przyklejenia lub przytopienia otaczającego proszku. Temperatura rozchodzi się bowiem w głąb materiału mogąc powodować spieknięcie. Podobnie jest także z krawędziami. Te przebiegające poziomo wykazują wręcz metaliczny połysk – wiązka lasera wpływa na te punkty bezpośrednio podczas stapiania oraz pośrednio poprzez transfer temperatury z następną tworzoną warstwę.

W wykonanym procesie SLM zastosowano podpory o długości 2 mm, jednak zaleca się stosowanie podpór o większej długości. Ma to na celu uniknięcie odkształceń, wynikające z demontażu próbek z platformy roboczej stolika.

Przed interpretacją wyników należy jeszcze zwrócić uwagę na dane jakimi posłużono się w pracy do sporządzenia wykresów naprężeń. Otóż skrócenie względne wynika z pomiarów wykonanych na rzeczywistej bryle (badania mikroskopowe i odczyty skrócenia próbki podczas próby ściskania), jednak naprężenie wynika z ilorazu siły ściskania, którą zarejestrowała rzeczywistość maszyna, do przekroju poprzecznego bryły jaką zaprojektowano, a jak wcześniej zostało napisane, wymiary wytworzonych próbek różniły się od modeli cyfrowych. Pole przekroju poprzecznego różni się z rzeczywistym, a tym samym wyniki uzyskane z powyższych badań nie mogą być traktowane jako miarodajne, nie mniej jednak dane te pozwoliły na przeanalizowanie tych struktur między sobą.

Struktura **kolumny**, spośród wszystkich modeli, wykazała się największą wytrzymałością na ściskanie ($F_c=10814,78$ N). Biorąc jednak pod uwagę przekrój poprzeczny ($S_0=27,04$ mm²), naprężenie nie osiąga już tak wysokich wartości nad pozostałymi próbkami ($R_c=399,95$ MPa). Była ona również najcięższa (1,82 g), skąd można było się spodziewać oporu jaki stawiała podczas próby. Struktura ta wykazała również największą gęstość względną ($\rho=0,4$) oraz współczynnik gęstości powierzchni ($\beta=8,43$). Próbką ta nie reprezentuje, więc istotnych wartości konstrukcyjnych, czy ekonomicznych.

Strukturami wykazującymi wysoką wytrzymałość na ściskanie były również **powierzchnia minimalnych naprężeń** oraz **stelaż**. Ta pierwsza jednak wykazuje ponad dwukrotnie mniejszy przekrój poprzeczny ($S_0=17,22$ mm²), jak również ma mniejszą masę (0,98g) niż **stelaż** (1,2 g). Warto tutaj jeszcze nadmienić, że **powierzchnia minimalnych naprężeń** została zamodelowana z najmniejszymi wymiarami zewnętrznymi bryły. Dobrymi własnościami mechanicznymi charakteryzowała się również próbka **DNA**. Mimo jeszcze mniejszej masy (0,87 g) od wyżej wymienionych uzyskała czwartą wytrzymałość na ściskanie ($R_c=245,93$ MPa). Warto również zauważyć zależność, która wynika z wykresu naprężeń i wyglądu próbki po ściśnięciu. Zarówno krzywa **powierzchni minimalnych naprężeń** jak i **stelaża** osiąga wartość R_c na wykresie znacznie później niż pozostałe. Widoczne jest to również na zbadanych próbkach. Obie skróciły się bez większej ilości odprysków, złamań i widocznych pęknięć, także może to potwierdzić fakt, że obie wykazują większą plastyczność względem pozostałych. Cecha taka często wykorzystywana jest w konstrukcjach, które, po przekroczeniu R_c , nie mogą nagle ulec zniszczeniu.

Wzór do obliczania R_c w przypadku badań struktur komórkowych jest wadliwy. Dane bowiem jakie są wymagane przy obliczeniach nie odzwierciedlają w pełni charakterystyki

wytrzymałościowej modeli. Stosowany do wyliczeń przekrój poprzeczny S_0 różni się znacznie już na odległościach 1mm w górę lub w dół. Przykładem tego był model **sfera**, który na obu wykresach zajmował przedostatnie miejsce. Jednak ze względu na niskie S_0 jego R_c wyniosło znacznie więcej niż **klepsydra**. Najlepszy obraz wytrzymałości dają, więc bezpośrednie odczyty z wykresu próby ściskania próbek.

LITERATURA

1. Król M., Kujawa M., Dobrzański L.A., Tański T., *Influence of technology parameters on additive manufacturing steel parts in selective laser sintering*, Archives of materials science and engineering, 67/2 (2014) 84-92;
2. <http://grzegorzbudzik.sd.prz.edu.pl> dostęp dnia 22.12.2015;
3. www.przyrostowo.pl dostęp z dnia 28.12.2016;
4. Bauer J., Hengsbach S., Tesari I., Schwaiger R., Kraft O., *High-strength cellular ceramics composites with 3D microarchitecture*, PNAS, 111/7, 2453-2458.
5. Hao L., Raymont D., Yan C., Hussein A, YoungP., *Design and Additive Manufacturing of Cellular Lattice Structures*, Innovative developments in virtual and physical prototyping- Bartolo et al., Taylor & Francis Group, London 212, 249-254.
6. Contuzzi N., Campanelli S. L., Casavola C., Lamberti L., *Manufacturing and characterization of 18Ni marage 300 lattice components by selective laser melting*, Materials 6, 2013, 3451-3468.
7. <http://softimage.wiki.softimage.com> dostęp dnia 10.01.2016.
8. Jastrzębski T., *Stopy tytanu w konstrukcjach oceanotechnicznych*, Mechanika Nr 250/99 Z.58 (1999), 44-54.
9. Melehow R., Tubielewicz K. i Błaszczuk W., *Tytan i jego stopy*, Częstochowa 2004, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej.

