

Ultralekkie konstrukcje metaliczne wytwarzane metodą SLM

M. Zemlik^a, M. Król^b,

^a – Student Politechniki Śląskiej, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska,
e-mail: marcin.zemlik@o2.pl

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

Streszczenie: Celem pracy było zaprojektowanie cyfrowych modeli 3D w oparciu o oprogramowanie CAD, charakteryzujących się wysoką wytrzymałością i zarazem niską wagą całkowitą, wydruk wybranych modeli techniką selektywnego przetapiania laserowego SLM oraz określenie poprawności wykonania w oparciu o badania z wykorzystaniem mikroskopu stereoskopowego oraz zbadanie wytrzymałości na ściskanie gotowych modeli. Zastosowanym materiałem do druku był stop tytanu Ti-6Al-4V. Przed wyborem do druku opracowanych ultralekkich konstrukcji, dokonano weryfikacji numerycznej o symulację MES. W końcowym etapie badań dokonano porównania wyników badań otrzymanych z symulacji oraz rzeczywistych pomiarów wytrzymałości na ściskanie.

Abstract: The aim of this work was to design digital 3D models based on CAD software, that will poses high strength and low total weight, producing selected models with selective laser melting technique (SLM) and defining the correctness based on tests using stereoscopic microscope and testing the compression strength of finished models. The material used for printing was Ti-6Al-4V titanium alloy. Before choosing to print the ultralight designs, numerical verification were performed by FEM simulation. In the final stage of the study, the results of the tests obtained from the simulation and the actual measurements of the compressive strength were compared.

Key words: selective laser melting, wytrzymałość na ściskanie, Solidworks, MES, druk 3D

1. WSTĘP

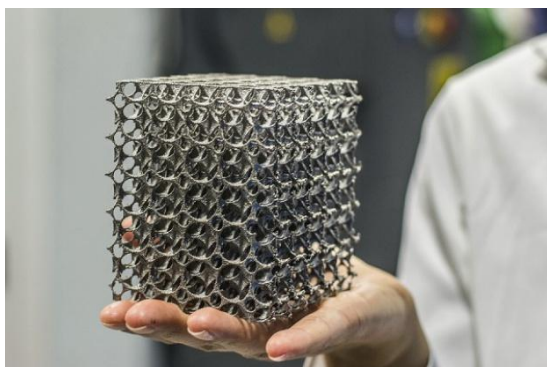
Druk 3D jest technologią przyrostową, która ułatwia oraz przyspiesza przetestowanie oraz proces wdrożenia produktu na rynek. Druk ten polega na utworzeniu fizycznego obiektu z cyfrowego projektu. Zaprojektowany obiekt po wydruku, w zależności od

zastosowanej techniki przyrostowej, charakteryzuje się wysoką rozdzielczością, odpowiednią grubością warstw i dużą dokładnością wymiarową [1-3].

W druku 3D swoje zastosowanie znalazły ultralekkie materiały. Są to lekkie komponenty, których gęstość jest poniżej 10 mg/cm^3 . W skład ich wchodzi aerozele, nanorurki, pianki metalowe i pianki polimerowe. Materiały te stosowane są głównie do minimalizacji masy obiektu przy relatywnie niskiej utracie własności wytrzymałościowych [4].

Praca przedstawia wyniki badań własnych dotyczące ultralekkich komponentów. Zaprojektowane modele 3D w oparciu o prace z wykorzystaniem oprogramowania CAD zostały wytworzone dzięki zastosowaniu drukarki 3D działającej w technologii selektywnego przetapiania laserowego SLM. W pracy dokonano porównania wyników badań wytrzymałości na ściskanie oraz symulacji otrzymanych modeli z wykorzystaniem środowiska Solidworks [5, 6].

Druk 3D to nie tylko przygotowywanie prototypów, ale także przygotowywanie gotowych produktów [1]. Wytwarzanie przyrostowe polega na wykonywaniu obiektu poprzez dodawanie warstwa po warstwie materiału w celu uzyskania określonego trójwymiarowego modelu. Ze względu na typ przekazywanych danych z cyfrowego modelu 3D, bądź innego elektronicznego źródła danych jak na przykład pliki AMF (Additive Manufacturing File), wytwarzane obiekty mogą charakteryzować się złożonymi kształtami oraz geometriami (Rysunek 1) [1-6].



Rys. 1. Przykłady zastosowania techniki 3D [7, 8]

Fig. 1. Examples of 3D application

Obecnie branża druku 3D (w kategorii przemysłowej i konsumenckiej) jest wyceniana na około 7 miliardów dolarów. Dzięki większej dostępności oraz możliwości sprzedawanych drukarek 3D spowodowała ogromny wzrost popularności tej metody. Przewiduje się, że druk 3D zmieni sposób w jaki dokonuje się projektowanie oraz wytwarzanie elementów od podstawowych narzędzi wykorzystywanych w codziennym życiu do najbardziej specjalistycznych elementów maszyn [3].

2. MATERIAŁ I METODYKA BADAŃ

Materiałem jaki wykorzystano do wydruku techniką SLM zaprojektowanych struktur był stop Ti-6Al-4V, którego skład chemiczny przedstawiono w tabeli (Tabela 1). Stop ten jest najczęściej wykorzystywanym stopem tytanu. Posiada bardzo dobrą odporność na korozję także w atmosferze wody morskiej, cechuje się niskim współczynnikiem sprężystości, niską rozszerzalnością cieplną. Jest niemagnetyczny, posiada dobrą odporność na zmęczenie i dobre właściwości mechaniczne w wysokich temperaturach. Znajduje zastosowanie w wytwarzaniu łopatek turbinowych, elementów konstrukcyjnych samolotów, łączników, do produkcji implantów, narzędzi i sprzętu sportowego. W tabeli 1 przedstawiono skład chemiczny zastosowanego stopu Ti-6Al-4V.

Tab.1. Skład chemiczny stopu tytanu Ti-6Al-4V

Tab. 1. Chemical composition of Ti-6Al-V alloy

Ti	Al	V	Fe	O	C	N	H	Y	Pozostałe razem
87,4 - 91,0	5,5- 6,75	3,5- 4,5	max. 0,3	max. 0,2	max. 0,08	max. 0,05	max. 0,0125	max. 0,005	max. 0,4

Do zaprojektowania ultralekkich struktur wykorzystano środowisko Autodesk Fusion 360 i Solidworks. Czynnikiem decydującym o wyborze struktury do druku były jak najniższa waga elementu charakteryzującego się wymiarami 10x10x10 mm.

W celu określenia wytrzymałości na ściskanie zaprojektowanych struktur wykonano symulacje komputerową z wykorzystaniem środowiska Solidworks Simulation. Siłę ściskania dobrano eksperymentalnie i ustalono na poziomie 1000 N.

Opracowane cyfrowo modele zostały przekonwertowane do formatu STL, które zostały wykorzystane w drukarce 3D. Do druku techniką SLM wykorzystano urządzenie firmy Reinshaw, model AM 125.

Do wydruku wykorzystano następujące parametry:

- Średnica wiązki lasera: 0,13 mm,
- Prędkość lasera: 289 mm/s,
- Moc lasera: 90 W,
- Kąt nakładania następnej warstwy: 67°,
- Odległość pomiędzy warstwami: 0,03 mm.

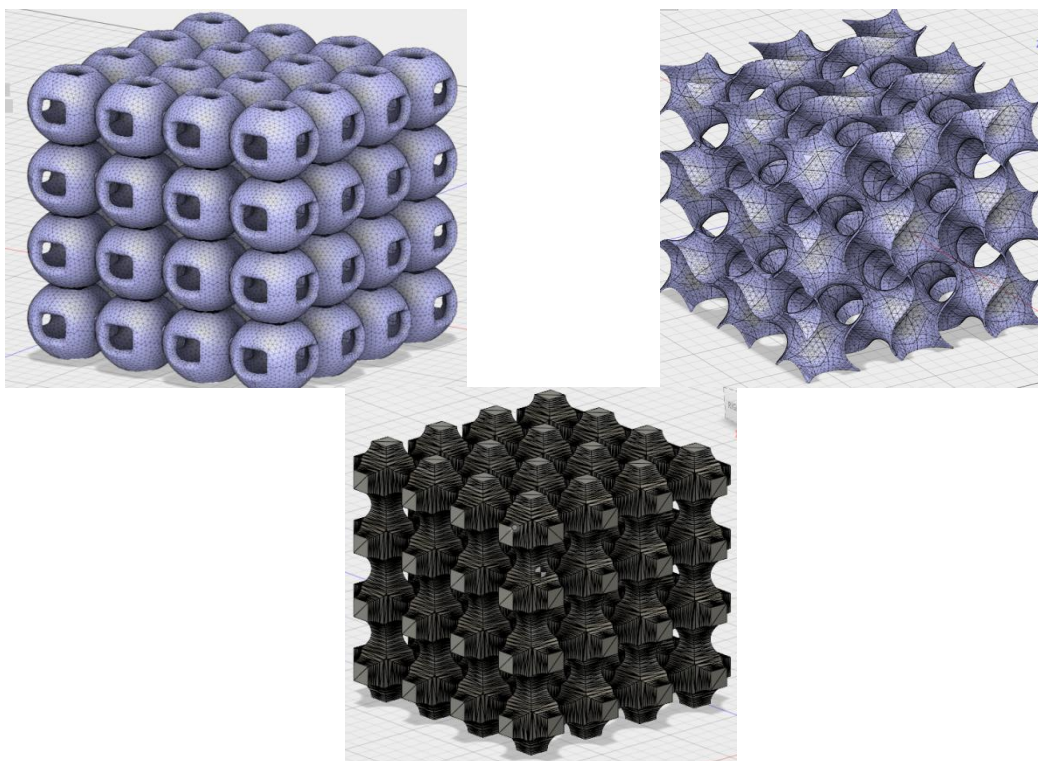
Wydruk modelu odbył się w atmosferze ochronnej argonu przy obniżonym ciśnieniu.

Do oceny jakości wykonania modeli wykorzystano mikroskop stereoskopowo AxioCam HRC. Wykonano zdjęcia przy powiększeniach 10x, 15x, 25x, 50x, 70x, 90x oraz 100x.

Ocenę wytrzymałości na ściskanie wydrukowanych modeli wyznaczono na podstawie statycznej próby ściskania z wykorzystaniem uniwersalnej maszyny wytrzymałościowej Zwick Z100.

3. OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ

Na rysunku 2 przedstawiono widok izometryczny zaprojektowanych i przygotowanych modeli do druku. Zaprojektowane modele wybrane do druku charakteryzowały się wagą przedstawioną w tabelicy 2.



Rys. 2. Zaprojektowane ultralekkie modele w programie CAD

Fig. 2. Ultra-light models created in CAD software

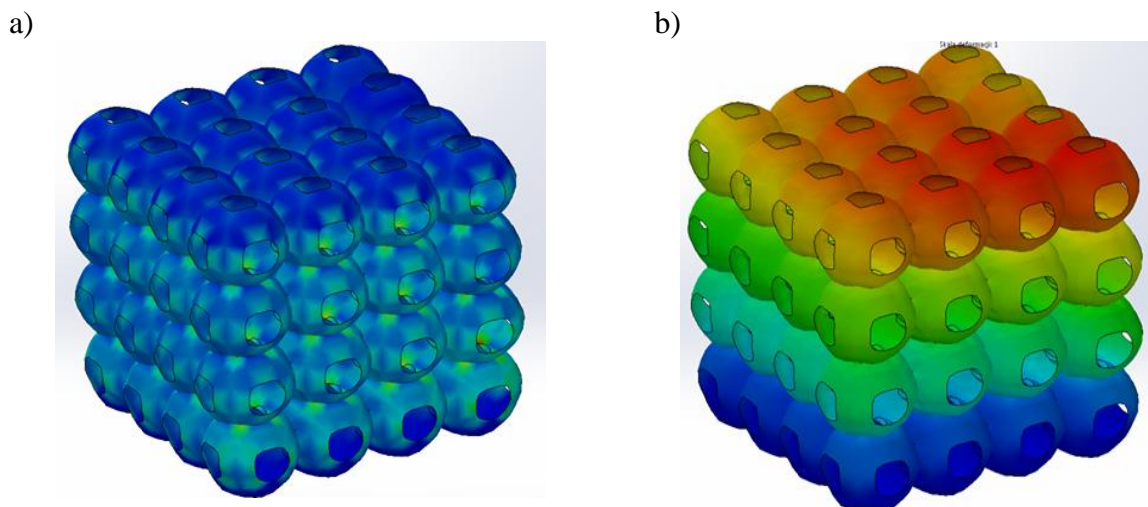
Tab. 2. Waga zaprojektowanych modeli

Tab. 2. Weight of created models

	Waga [g]
Model 1	0,09
Model 2	0,07
Model 3	0,04

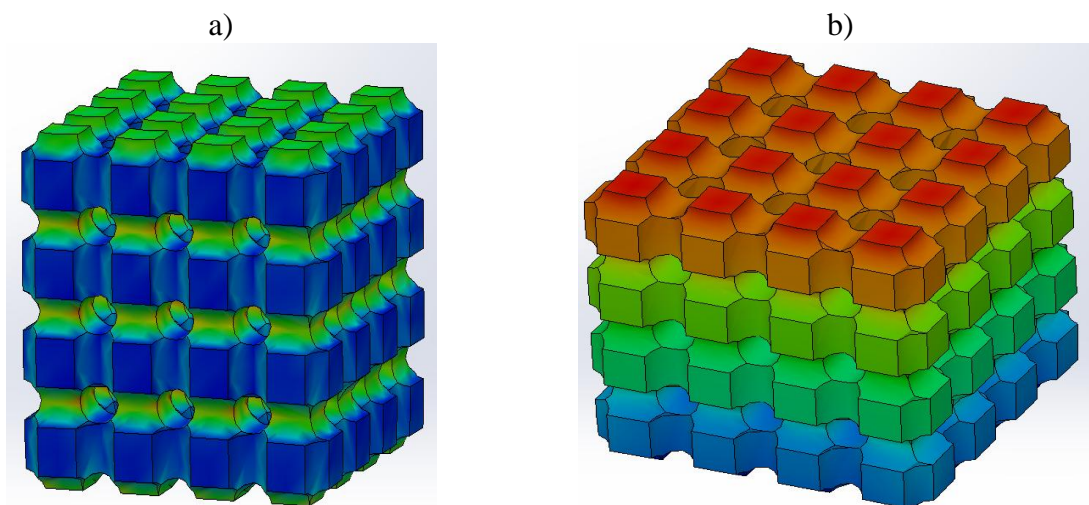
Tak opracowane modele numeryczne poddano weryfikacji komputerowej w celu określenia wytrzymałości na ściskanie. Zastosowana wartość siły podczas symulacji wynosiła 1000 N.

Uzyskane wartości naprężenia oraz przemieszczenia przedstawiono schematycznie na rysunku 3 i 4 oraz w tabeli 3.



Rys. 3. Reprezentatywne wyniki symulacji przedstawiające wartość naprężenia (a) oraz przemieszczenia (b) Modelu 1

Fig. 3. The representative FEM result of the strain (a) and displacement values (b) of Model 1



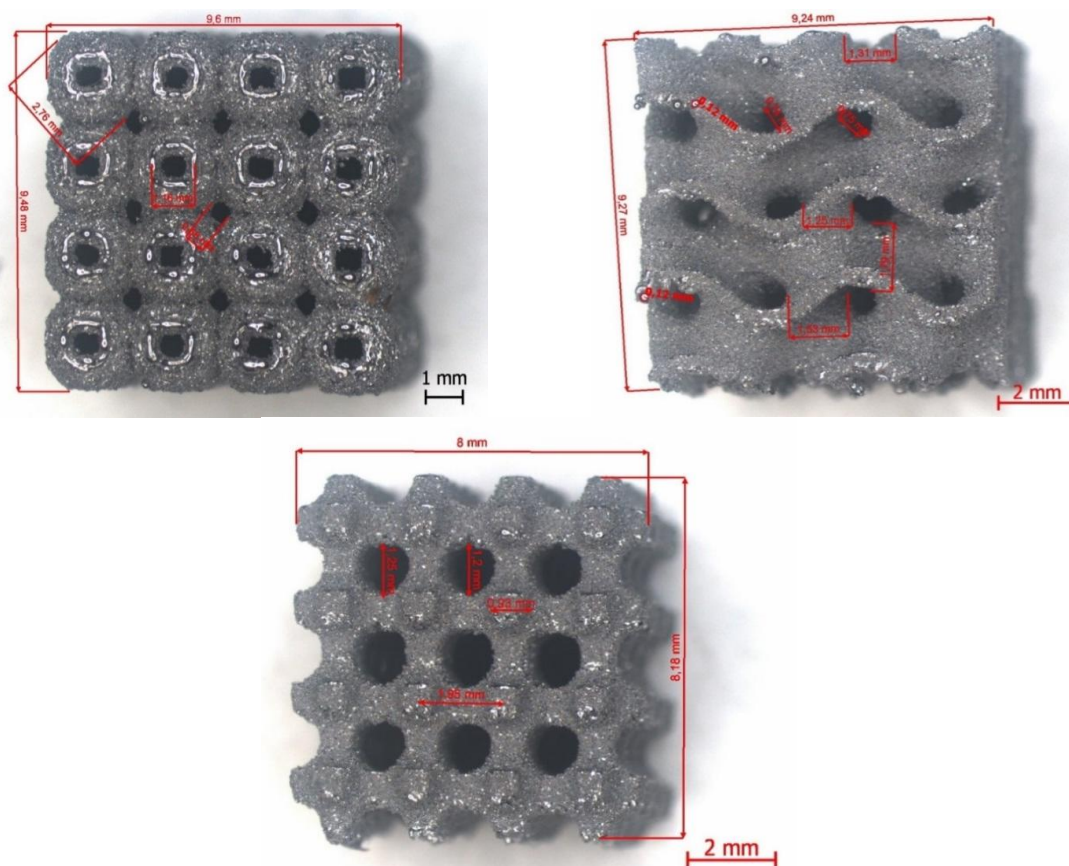
Rys. 4. Reprezentatywne wyniki symulacji przedstawiające wartość naprężenia (a) oraz przemieszczenia (b) Modelu 3

Fig. 4. The representative FEM result of the strain (a) and displacement values (b) of Model 3

Tab. 3. Wyniki symulacji badania ściskania
 Tab. 3. Results from simulation of compression test

	F_{\max}	dL przy F_{\max}	F_{zniszcz}	dL przy zniszczeniu	a_0	b_0	S_0	σ
Jednostki	N	mm	N	mm	mm	mm	mm ²	MPa
Model 1	1000	1,42	próbka nie została zniszczona	10	10	33,05	1823,3	
Model 2	1000	1,21	próbka nie została zniszczona	10	10	25,68	642,083	
Model 3	1000	0,49	próbka nie została zniszczona	8	8	10,24	1284,94	

Obserwacja mikroskopowa otrzymanych modeli wykazała, że Model 1, sześcián P Schoena posiada najwięcej nadtopień materiału w wyniku wydruku ostatniej warstwy modelu. Efekt ten mógł być spowodowany faktem, że model STL dla powyższej bryły składał się z drobniejszej siatki niż pozostałe modele, czego rezultatem jest bardziej precyzyjny obiekt, który przy określonych małych rozmiarach utrudnił wykonanie elementu przez drukarkę 3D (rysunek 5).

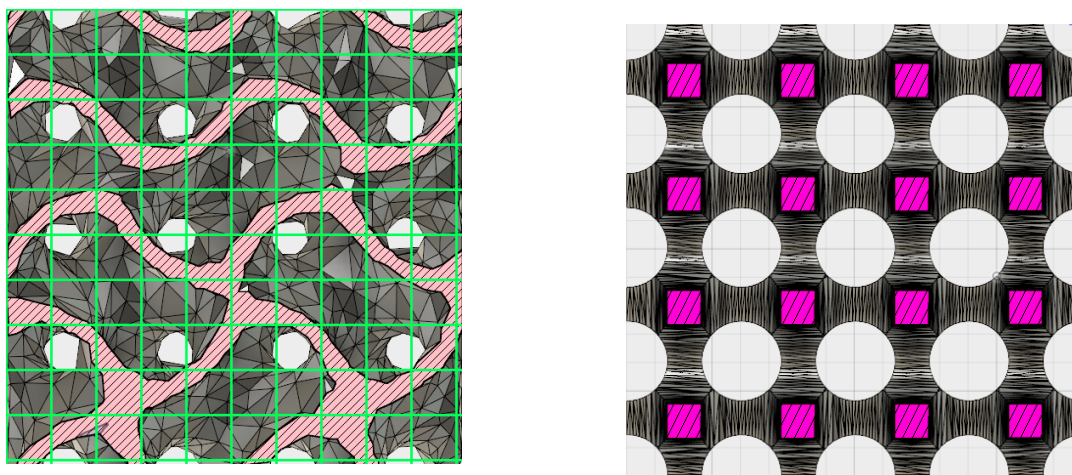


Rys. 5. Zdjęcia makrostruktury wydrukowanych modeli
 Fig. 5. Macrostructure of printed models

Kolejnym dowodem wystąpienia nadtopień jest duża wielkość pliku STL (ok. 80mb) w stosunku do innych modeli (ok. 10mb). Ilość wytworzonych trójkątów w meshu mogła mieć wpływ na jakość wydruku. Model 2, gyroid posiada mniej nadtopień w odniesieniu do modelu 1 jak również kształt był bardziej odwzorowany. W modelu 2 nadtopienia występują w formie kolistej, co może być spowodowane przez nieregularny kształt bryły w stosunku do pozostałych modeli. Na granicy wystąpiło zerwanie materiału, czego skutkiem jest niedokończony bok figury. Powodem tego może być nieadekwatnie dobrana prędkość punktowa na granicy próbki podczas wyboru parametru druku.

Model 3 posiada najbardziej regularną strukturę z badanych modeli, czego skutkiem jest najmniejsza ilość nadtopień lub nieregularności. Podobnie jak z Modelem 2 na granicy próbki znajdują się niedokończone boki figury. Niedokończenia występują w kilku miejscach na granicy próbki. Model 3 został najdokładniej odwzorowany w porównaniu do pozostałych próbek, czego dowodem jest mała różnica pomiędzy pomiarami elementów składowych bryły (np. przewężenia, średnice otworów, wypustki).

W celu wyznaczenia rzeczywistych naprężeń w modelach niezbędne było wyznaczenie pola przekroju poprzecznego modeli. Dla uproszczenia obliczeń przyjęto pole powierzchni w połowie wysokości poszczególnych modeli. Pole porzeczne przekroju wyznaczono o metodę najmniejszych kwadratów (Rysunek 6).



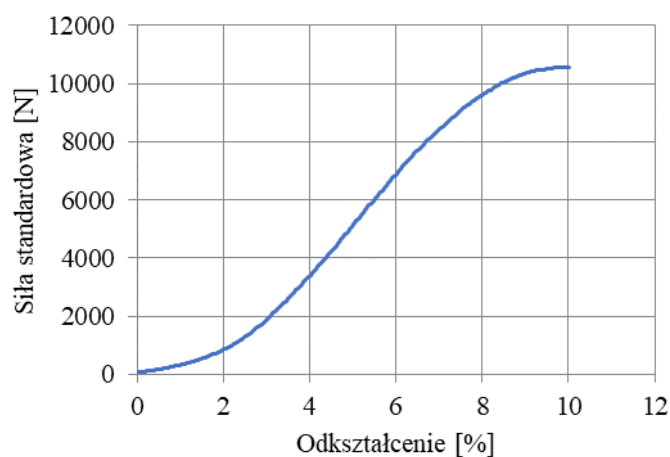
Rys. 6. Widok przekroju analizowanych modeli wraz z zaznaczonym obszarem pomiarowym

Fig. 6. The cross-section of the analysed models with the selected measurement area

Wyniki badań ze statycznej próby ściskania przedstawiono w tablicy 4 oraz na rysunkach 7 i 8.

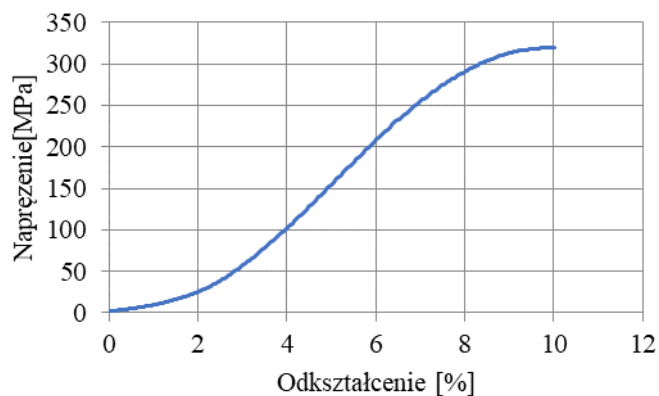
Tab. 4. Wyniki statycznej próby na ściskanie
 Tab. 4. Results from compression test

	F_{\max}	dL przy F_{\max}	F_{zniszcz}	dL zniszcz.	a_0	b_0	S_0	σ
Jednostki	N	Mm	N	mm	mm	mm	mm ²	MPa
Model 1	10567,79	0,9954	próbka nie została zniszczona	10	10	10	33,05	319,02
Model 2	6260,883	0,9809	próbka nie została zniszczona	10	10	10	25,68	241,08
Model 3	6247,782	0,9982	próbka nie została zniszczona	8	8	8	10,24	601,94



Rys. 7. Reprezentatywny wykres zależności siły do odkształcenia, model 1
 Fig. 7. Representative force vs. displacement graph of model 1

Na podstawie uzyskanych danych sporządzono wykresy zależności naprężenia w funkcji odkształcenia badanych modeli (Rysunek 8).



Rys. 8. Reprezentatywny wykres wytrzymałości na ściskanie, model 1
 Fig. 8. Representative results of calculated strain of model 1

Zarejestrowana umowna granica sprężystości dla modelu 1 wyniosła $R_{e0,01}=1,93$ MPa. Z uzyskanych wyników wynika, iż stop tytanu, z którego wykonano modele jest materiałem niewykazującym wyraźnej granicy plastyczności. Próbka nie została złamana podczas próby ściskania, natomiast badanie zakończyło się, gdy naprężenie maksymalne próbki zostało przekroczone. Na tej podstawie wyznaczono maksymalne naprężenie wynoszące $\sigma_{\max}=319,55$ MPa.

Tabela 5 przedstawia porównanie uzyskanych wyników badań wytrzymałości na ściskanie uzyskanych z maszyny wytrzymałościowej oraz symulacji MES wykonanej w Solidworks Simulation. Maksymalne naprężenie modelu 1 z symulacji wyniosło 2423,3 MPa, co stanowi wynik 4 razy większy niż wynik uzyskany z maszyny wytrzymałościowej (319 MPa). Podobną tendencję zauważono dla pozostałych modeli, gdzie wartość symulacji jest kilkukrotnie większa od wyników uzyskanych z badań rzeczywistych na maszynie wytrzymałościowej. Powodem zaistniałej sytuacji wystąpienia dysproporcji w wynikach mogą być źle dobrane warunki brzegowe jak również błędne założenia przyjęte przez symulacje.

Tab. 5. Porównanie wyników rzeczywistych oraz symulacji dla badania wytrzymałości na ściskanie

Tab. 5. Comparison of real results and results from simulation of compression test

Parametry	Wyniki rzeczywiste			Wyniki symulacji		
	F_{\max}	dL przy F_{\max}	σ	F_{\max}	dL przy F_{\max}	σ
Jednostki	N	Mm	MPa	N	Mm	MPa
Model 1	10567,79	0,9954	319,02	1000	1,21	2423,3
Model 2	6260,883	0,9802	241,08	1000	1,12	742,08
Model 3	6247,782	0,9982	601,94	1000	0,49	1484,9

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Oprogramowanie CAD oraz MES pozwala na zaprojektowanie modelu, wykonanie wstępnej analizy wytrzymałościowej oraz jest wstępem do wydruku 3D modelu prototypowego. Jednakże sposób wykonywanie symulacji procesu wiąże się z prawdopodobieństwem wystąpienia odchyleń od rzeczywistych wyników.

Wykorzystywanie ultralekkich konstrukcji może określić przyszłość materiałoznawstwa. Nanorurki węglowe znajdują coraz szersze spektrum zastosowań podobnie jak aerozele lub pianki metalowe. Obecnie, ultralekkie konstrukcje są stosowane głównie do minimalizacji masy obiektu, jednakże stawia się nacisk na uzyskanie jak najlepszych własności mechanicznych przy zachowaniu minimalnej masy.

Skomplikowane kształty mogące zmaksymalizować potencjał ultralekkich materiałów jak np. gyroid są ciężkie do wykonania przy użyciu konwencjonalnych metod produkcji. Wymagana dokładność przy utrzymaniu szybkości wykonania i niskiego kosztu produkcji może zostać osiągnięta dzięki technologii druku 3D. Owa dziedzina nauki jest wciąż rozwijana, dzięki czemu będzie można lepiej wykorzystać jej potencjał.

Wykorzystane oprogramowanie pozwala na skrócenie czasu produkcji nowych elementów, obniżenie kosztów wytwarzania oraz prowadzi do oszczędzenia materiałów potrzebnych do produkcji. Wartości naprężenia uzyskane w wyniku wykonanej symulacji są kilkukrotnie większe od wartości rzeczywistych. Powodem wystąpienia tak znaczących różnic może być niepoprawnie przyłożona do modelu siła, nieadekwatne warunki brzegowe (np. oznaczenia nieruchomej geometrii modelu) oraz różnice w grubości pomiędzy próbką a modelem numerycznym.

Kolejnym powodem zmiany wymiarów jest różnica w modelu rzeczywistym a wykonanym w symulacji. Metoda SLM jak inne metody druku 3D wykonuje próbki warstwa po warstwie w odróżnieniu od jednolitego modelu numerycznego w programie CAD. Powierzchnia wydrukowanego elementu nie jest gładka. Model, który uwzględniałby chropowatość byłby niepotrzebnie złożony dzięki czemu wymagałby zbyt dużej mocy obliczeniowej.

Stopień skomplikowania elementów jak również niewielki rozmiar mogą decydować o jakości wykonania modelu przy pomocy drukarki 3D. Symulacja nie jest w stanie przy małych rozmiarach próbki wykonać odpowiednio drobnej siatki. Złożoność wykonanych modeli wpływa również na wydajność komputera, na którym dokonujemy obliczeń.

Jakość dostarczanych do drukarki plików STL ma wpływ na wykonany przy pomocy druku model. Zbyt duże nagromadzenie linii przecięcia powoduje wyboczenia od modelu w postaci nadtopień bądź ubytków materiału na jego brzegach.

LITERATURA

1. C. Haase, J. Bültmann, J. Hof, S. Ziegler, S. Bremen, C. Hinke, Exploiting process-related advantages of selective laser melting for the production of high-manganese steel, *Materials*, 10/1 (2017) 1-14.
2. A.G. Demir, B. Previtali, Additive manufacturing of cardiovascular CoCr stents by selective laser melting, *Materials & Design*, 119 (2017) 338-350.
3. A. Ortona, Modeling the Properties of Cellular Ceramics : From Foams to Lattices and Back to Foams, *Advances in Science and Technology* 2014.
4. D.W. Wei, Y. Koizumi, Y. Li, K. Yamanak, A. Chiba, Submicron lamellar porous structure formed by selective dissolution of Ti-Al alloy, *Materials and Design*, 98 (2016) 1-11.
5. D. Herzog, V. Seyda, E. Wycisk, C. Emmelmann, Additive manufacturing of metals, *Acta Materialia*, 117 (2016) 371-392.
6. P. Hanzl, M. Zetek, T. Baksa, T. Kroupa, The influence of processing parameters on the mechanical properties of SLM parts, *Procedia Engineering*, 100 (2015) 1405-1413.
7. <http://it.wnp.pl>
8. <http://www.rabbitform.pl>