

Kompozyty polimerowe wzmacniane tytanowymi rusztowaniami wytworzonymi techniką SLM

A. Skrzypczyk^a, K. Topolska^a, S. Małek^a, M. Król^b

^a – Student Politechniki Śląskiej, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, Studenckie koło naukowe Gyroid

e-mail: a.skrzypczyk.a@gmail.com, kat.topolska@gmail.com,

^b - Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska

e-mail: mariusz.krol@polsl.pl

Streszczenie:

Zakres badań obejmował wytworzenie kompozytów polimerowych na osnowie żywicy poliestrowej wzmacnianej tytanowymi rusztowaniami wytwarzanymi techniką SLM (ang. Selective Laser Melting) oraz proszkami żelaza i kobaltu, a następnie badanie ich gęstości, twardości oraz odporności na ściskanie. W pierwszym etapie zaprojektowano skafold w środowisku CAD, a następnie wydrukowano go z wykorzystaniem technologii przyrostowej oraz infiltrowano żywicą wzmacnianą proszkami żelaza i kobaltu. Zbadanie tak wytworzonych kompozytów miało za zadanie zweryfikowanie możliwości stworzenia kompozytów łączących cechy wysokich własności wytrzymałościowych, z dużą plastycznością oraz lekkością elementu.

Abstract:

The aim of the study was the fabrication of polymer composites based on polyester resin reinforced by titanium scaffolds produced in SLM and strengthened by Fe and Co powders and then study the density, hardness and compression resistance. In the first step, structures were computer-aided designed, and then 3D printed and filled by resin reinforced powders. Examine thus produced composites had the task verify possibility is creating composites combining the features of high strength properties with high plasticity and lightness component.

Keywords: selektywne spiekanie laserowe, kompozyty polimerowe, tytanowe rusztowanie, wytrzymałość na ściskanie, gęstość, twardość

1. WSTĘP

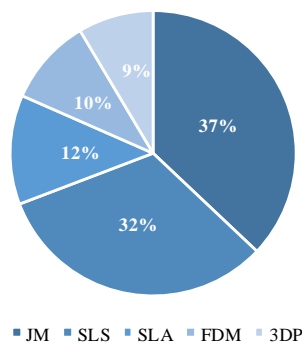
Pojęcie „kompozyt” (łac. *copositus* - złożony) oznacza materiał składający się przynajmniej z dwóch różnych materiałów, które w przypadku materiału wytwarzanego przez człowieka, zostały celowo ze sobą zmieszane oraz rozłożone w sposób nadający optymalne własności całości, lepsze niż w indywidualnych składnikach. Dziedzina ta stanowi ogromny obszar możliwości wytwarzania kompozycji o odpowiedniej kombinacji składników kompozytowych (tzn. wymaganych własnościach i parametrach). Silny nacisk na rozwój kompozytów ukierunkowany jest na niską wagę komponentu oraz unikalne własności mechaniczne i wytrzymałościowe gotowej struktury [1].

W Polsce zauważalny jest duży sceptycyzm, w porównaniu do krajów wysoko rozwiniętych takich jak USA, Kanada, Japonia, Chiny, Francja, w stosunku do stosowania i rozwoju materiałów kompozytowych. Konstruktorzy, czy projektanci muszą jednak przyzwyczajać się do prężnego rozwoju tej dziedziny, wymuszonej stosowaniem materiałów, które jednocześnie mogą być lekkie oraz wytrzymałe, a przede wszystkim niezawodne. Kompozyty są bez wątpienia materiałem przyszłości i nic nie stoi na przeszkodzie, aby połączyć ich wytwarzanie z technikami przyrostowymi, które również wydają się być przyszłością rozwoju pod względem technologii wytwarzania [1].

Elementy składowe kompozytu spełniają odpowiednie funkcje. Osnowa ma zadanie: utrzymanie razem zbrojenia, nadanie odpowiednich kształtów wyrobom, przenoszenie naprężeń zewnętrznych na zbrojenie, zatrzymanie rozprzestrzeniania się pęknięć oraz zapewnienie wytrzymałości na ściskanie. Zbrojenie natomiast stosowane jest w celu wzmocnienia materiału oraz poprawienia jego własności mechanicznych [2]. Zbrojenie stanowi również główne kryterium podziału kompozytów, w której wyróżniamy te wzmocniane cząstkami, włóknami czy kompozyty strukturalne [3]. Innowacją w tej ostatniej grupie – kompozytów strukturalnych jest tworzenie wzmocnienia za pomocą druku 3D, który pozwala na otrzymywanie rdzenia o skomplikowanej geometrii [4].

Szybkie prototypowanie, czyli druk 3D to termin, z którym spotykać się można już od 1980 r. Używany on był do opisywania grupy technologii, które dosłownie wykonywały prototypy, robiąc to w sposób szybki i zautomatyzowany. Różnorodność technik prototypowania łączył jeden wspólny mianownik: model powstawał z płaskich warstw do momentu, w którym tworzył trójwymiarowe ciało stałe. W dzisiejszych czasach podział rynku druku 3D ze względu na wykorzystywaną metodą przedstawia się następująco (rys. 1.1) [5]:

Udział metod 3D na rynku

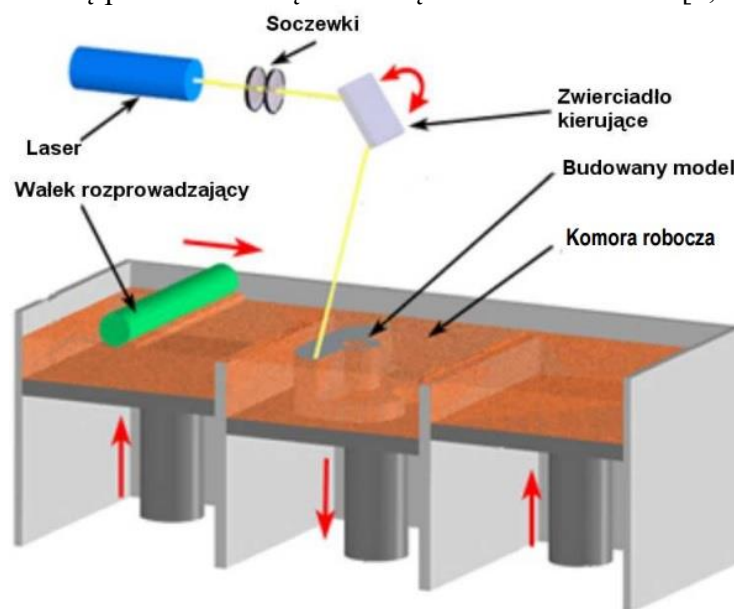


Rysunek 1.1. Udział na rynku metod druku 3D [6]
Figure 1.1. Market share 3D printing methods

- Rozwój druku 3D przez ostatnie lata głównie parcelował pomiędzy trzema branżami [5, 6]:
- ✓ przemysł motoryzacyjny – który stawiał na szybkość przedostania swoich produktów na rynek,
 - ✓ przemysł lotniczy - których interesowały złożone kształty, wysoka wydajność produktów, funkcjonalność, eliminacja montażu oraz lekkie konstrukcje z wysoką złożonością geometryczną,
 - ✓ przemysł medyczny - zainteresowany technologią przyrostową ze względu na łatwość tworzenia zindywidualizowanych implantów. Zwiększona wydajność technologii przyrostowej nieuchronnie oznacza znalezienie coraz większej liczby obszarów zainteresowań.

Obecnie istnieje kilka nurtów rozwoju szybkiego prototypowania, w których obok zwiększenia prędkości wykonania elementów oraz powstania zupełnie nowych obszarów zastosowań, wyłania się tendencja stosowania technologii przyrostowych w połączeniu z innymi procesami produkcyjnymi oraz ich zautomatyzowanie, czyli narodziny swoistej hybrydy. Hybryda ta może zostać ujęta w dziedzinie tworzenia kompozytów polimerowych ze wzmocnieniem w postaci tytanowego rdzenia wytwarzanego techniką SLM [5].

SLM (ang. Selective Laser Melting) – jest metodą selektywnego stapiania laserowego proszków. Dzięki tej technice można wytworzyć precyzyjne i jednorodne elementy z tworzyw metalowych, jak np. stopów tytanu, stali nierdzewnych czy stopów metali lekkich jak aluminium. Modele wytworzone metodą SLM są podobne do elementów odlewanych pod względem precyzji, gęstości i wytrzymałości. Schemat metody selektywnego stapiania laserowego proszków został przedstawiony na rysunku 1.2, a do wytworzenia elementu wykorzystywana jest wiązka lasera o dużej mocy skupiana, przez układ optyczny, kierowana jest na powierzchnie proszku, skanując według geometrii otrzymanych z danych CAD i powodując topienie się proszku oraz łączenie się materiału w całość [4, 5].



Rysunek 1.2. Schemat przedstawiający metodę SLM [7]
Figure 1.2. Diagram showing method SLM

Jednym z materiałów wykorzystywanych w technice SLM jest stop Ti-6Al-4V, który często nazywany jest również Ti64 lub Grade 5 i stanowi stop o strukturze dwufazowej $\alpha+\beta$.

Materiał ten ma ogromne znaczenie właśnie w tej grupie, gdzie cechuje się dużą wytrzymałością oraz dobrą podatnością na odkształcenie plastyczne. Własności stopu Ti-6Al-4V przedstawiono w tablicy 1.

Stop Ti-6Al-4V (tab. 1.) jest stopem szeroko stosowanym w przemyśle lotniczym i medycznym, ze względu na jego wysokie własności chemiczne, mechaniczne oraz wysoką biogodność. Najczęstszym sposobem jego przetwarzania są konwencjonalne, wysokotemperaturowe procesy. Obecnie rozwój technologii przyrostowej prowadzi do coraz większego zainteresowania tym materiałem. Technika SLM wykorzystuje właśnie ten stop do opracowywania i wytwarzania złożonych kształtów. Pozwala ona na uzyskanie struktury o otwartych porach i połączenia materiału w całej jego objętości poprzez proces przetapiania. Właściwości materiału po procesie selektywnego stapiania, zależą od jego mikrostruktury otrzymanej w wyniku doboru parametrów procesu [9-11].

Tablica 1. Własności stopu Ti-6Al-4V [10]

Table 1. Properties of the alloy Ti-6Al-4V

Własność	Ti-6Al-4V
Rodzaj struktury	Stop dwufazowy $\alpha+\beta$
Gęstość, (kg/m³)	4507
Temperatura topnienia, (°C ± 15)	1649
Temperatura końca przemiany $\alpha+\beta \rightarrow \beta$, (C° ± 15)	999
Przewodność cieplna, (W/(m·K))	7,2
Minimalna wytrzymałość na rozciąganie R_m, MPa	897
Min. Umowna granica plastyczności R_{0,2}, MPa	828
Moduł Younga E, (GPa)	114
Minimalne wydłużenie A, w temp. 20°C, (%)	10
Zawartość zanieczyszczeń lub innych dodatków stopowych (% masowy)	0,2 O; 0,3 Fe

Technika SLM pozwala na otrzymywanie lekkich konstrukcji oraz struktur wypełnionych powtarzającymi się jednostkami, czy struktur porowatych o zmiennej wielkości [11]. Dzięki dużemu postępowi w druku 3D, technika SLM jest metodą pozwalającą na uzyskiwanie geometrii nie tylko stałych, lecz również wykazujący szeroki zakres zmienności rozmiarów komórek, porowatości czy własności mechanicznych, które pozwalają na dostosowanie wydruków do różnych zleceń. Elementy wytwarzane za pomocą selektywnego spiekania cechują się własnościami podanymi w tablicy 2.

Podstawowym celem obróbki cieplnej stopów tytanu jest przemiana fazowa $Ti\alpha \leftrightarrow Ti\beta$, a konkretnie polepszenie dzięki temu własności plastycznych oraz usunięcie naprężeń powstałych podczas wytwarzania, do czego stosuje się wyżarzanie [12]. Dzięki odpowiednio

wykonanemu wyżarzaniu następuje wzrost ciągliwości materiału, niestety przy zmniejszeniu jego wytrzymałości. W celu uzyskania odpowiednio wysokiej kombinacji wytrzymałości z ciągliwością, w dalszym ciągu prowadzone są prace badawcze [13].

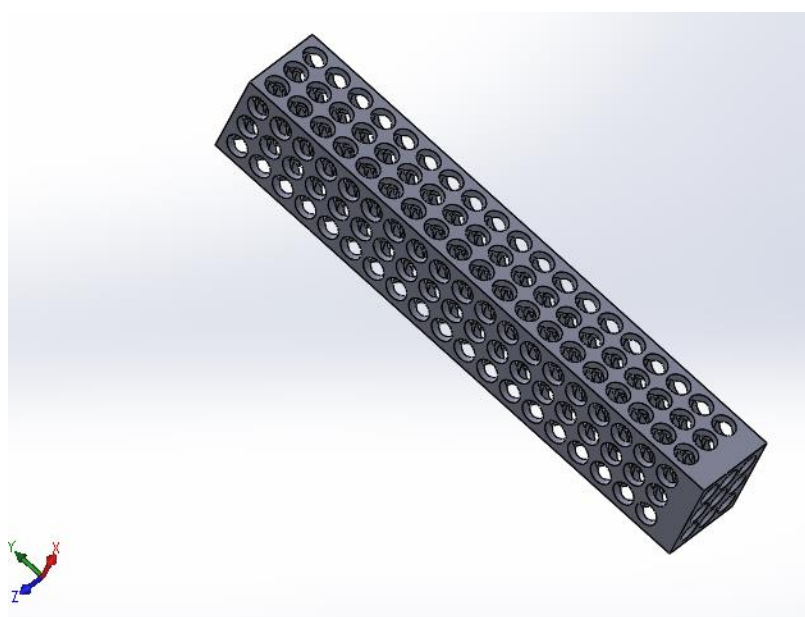
Tablica 2. Własności mechaniczne części wydrukowanej techniką SLM [26]

Table 2. Mechanical properties of part printed SLM

Material	Ti6Al4V
Wytrzymałość na rozciąganie (MPa)	1200-1400
Wydłużenie (%)	1-2
Twardość (HV)	380-420
Chropowatość (μm)	30-60
Dokładność	$\pm 0,1$

2. MATERIAŁY I METODYKA BADAŃ

Do zaprojektowania modelu wykorzystano oprogramowanie CAD, w którym stworzono model przedstawiony na rysunku 2.1. Model cechował się wymiarami 10x10x60 mm oraz porowatością w kształcie kołowym o średnicy 2,3 mm. Następnie został on wydrukowany z użyciem urządzenia AM 125 firmy Renishaw ze stopu Ti6Al4V. W kolejnym etapie model został poddany obróbce cieplnej polegającej na wyżarzaniu w temperaturze 850 °C przez 2 h w celu usunięcia naprężeń w materiale.



Rysunek 2.1. Model skaffoldu zaprojektowanego komputerowo
Figure 2.1. Digital image of scaffold

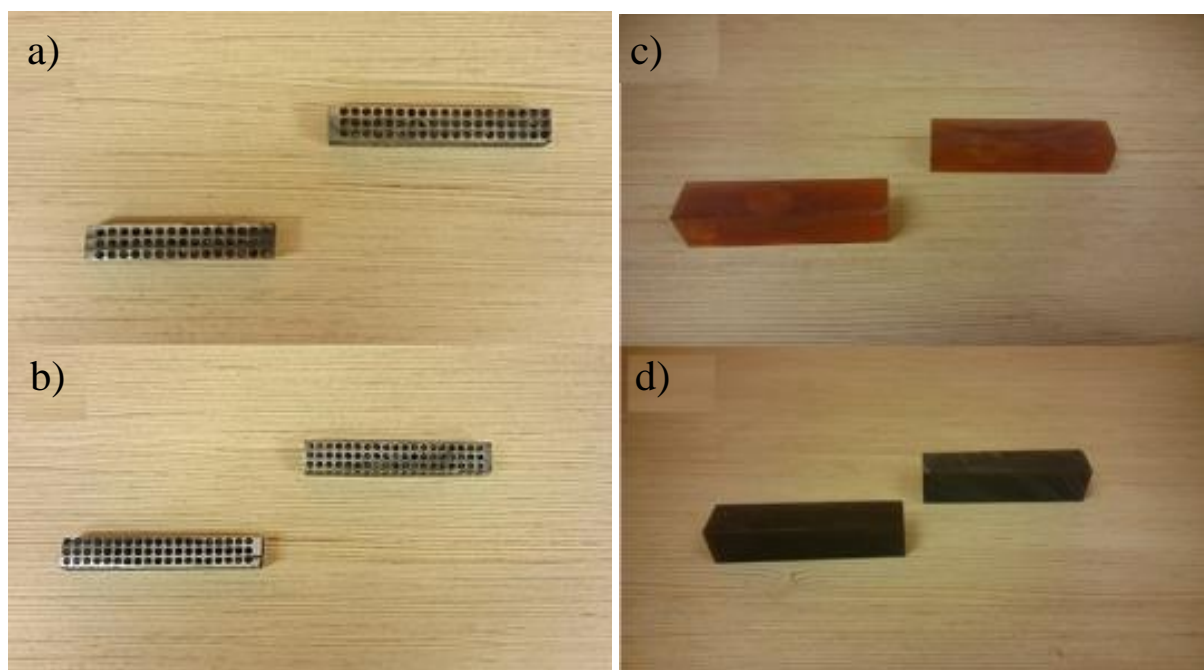
Wypełnienie otrzymanych porowatych scaffoldów stanowiła żywica poliestrowa firmy BOLL oraz proszek żelaza i kobaltu. Żywicę infiltrowano do próbek z wykorzystaniem podciśnienia, wytworzonego w formach. Ilość próbek wraz z dokładnym składem kompozytu przedstawiono w tabelicy 3 oraz na rysunku 2.2a i 2.2b. Dzięki wytworzonemu podciśnieniu zminimalizowano ryzyko powstania defektów i wad, np. pęcherzy powietrznych. W celu możliwości porównania własności kompozytów z żywicą poliestrową do własności samej żywicy lub żywicy z wypełniaczem, utworzono kolejne trzy grupy próbek (tab. 3 oraz rys. 2.2.c,d).

Wszystkie próbki, zarówno te stanowiące kompozyty polimerowe, jak i żywicę poliestrową wzmacnianą proszkami zostały poddane badaniom gęstości i wytrzymałości na ściskanie, a żywica wzmocniona proszkami dodatkowo badaniu twardości. Pomiarów te kolejno zostały wykonane na: gęstość - waga analityczna serii AS/X wyposażona w przystawkę do badania gęstości, twardość - za pomocą metody Kulkowej H z wykorzystaniem urządzenia Zwick Roell oraz wytrzymałość na ściskanie - na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej firmy Zwick, model Z100.

Tablica 3. Rodzaje wytworzonych próbek

Table 3. Types of manufactured samples

Grupa	Ilość próbek	Rodzaj kompozytu
I	1	Rusztowanie SLM + Żywica poliestrowa
II	2	Rusztowanie SLM + Żywica poliestrowa + wypełniacz jako proszek żelaza
III	2	Rusztowanie SLM + Żywica poliestrowa + wypełniacz jako proszek kobaltu
IV	2	Żywica poliestrowa
V	2	Żywica poliestrowa + wypełniacz jako proszek żelaza
VI	2	Rusztowanie SLM + Żywica poliestrowa + wypełniacz jako proszek kobaltu



Rysunek 2.2. Zdjęcia wytworzonych próbek a,b) kompozyty polimerowe wzmocniane tytanowym rusztowaniem, c,d) próbki z żywicy poliestrowej wzmocniane proszkami metali
Figure 2.2.. Photos of manufactured samples a,b) polymer composites reinforced with scaffolds, c,d) sample of polyester resin reinforced with metal powders

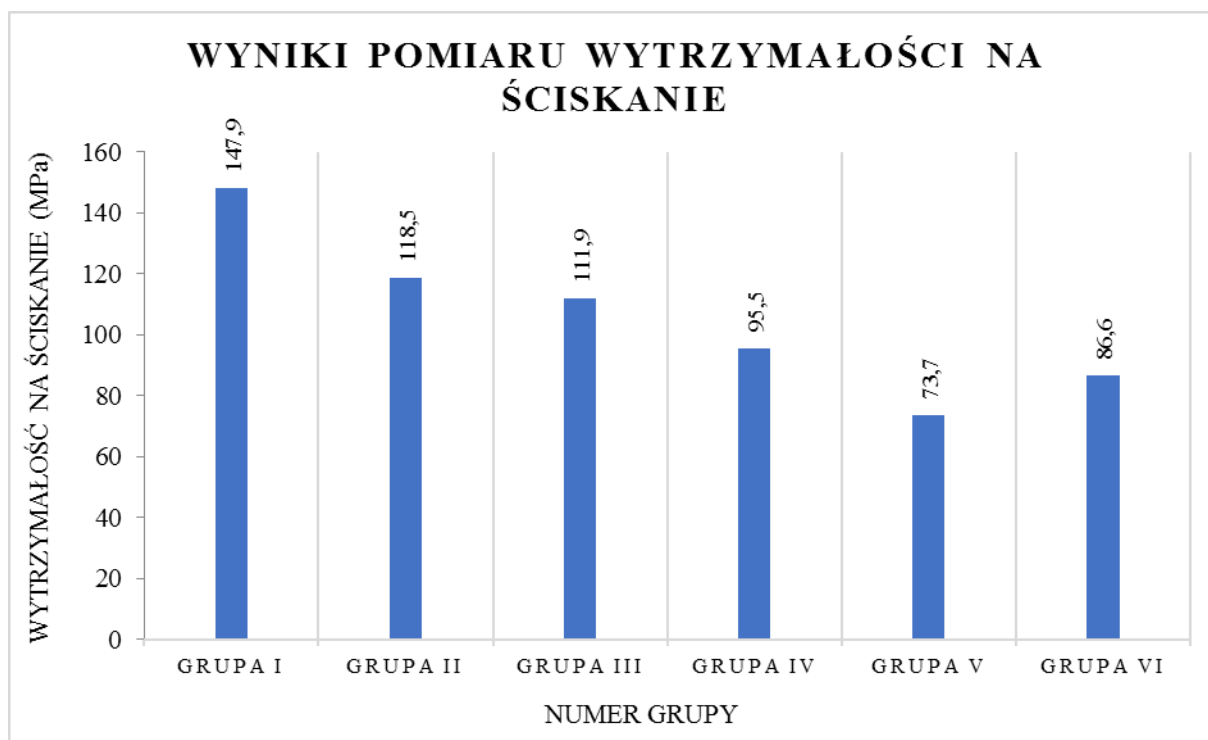
3. WYNIKI BADAŃ

Przeprowadzona próba ściskania pozwoliła na wyznaczenie wytrzymałości na ściskanie (tab. 4), które przedstawiono w celu lepszego zobrazowania w postaci wykresu słupkowego (rys. 3.1.). Dodatkowo umożliwiło to wygenerowanie wykresów naprężenie – odkształcenie (rys. 3.2. i 3.3.). Badanie pozwoliło określić wpływ dodatku proszków na własność odporności na ściskanie oraz jak dodatek rusztowania drukowanego 3D różnicuje te wartości.

Tablica. 4. Wyniki wytrzymałości na ściskanie.

Table 4. The results of compressive strength

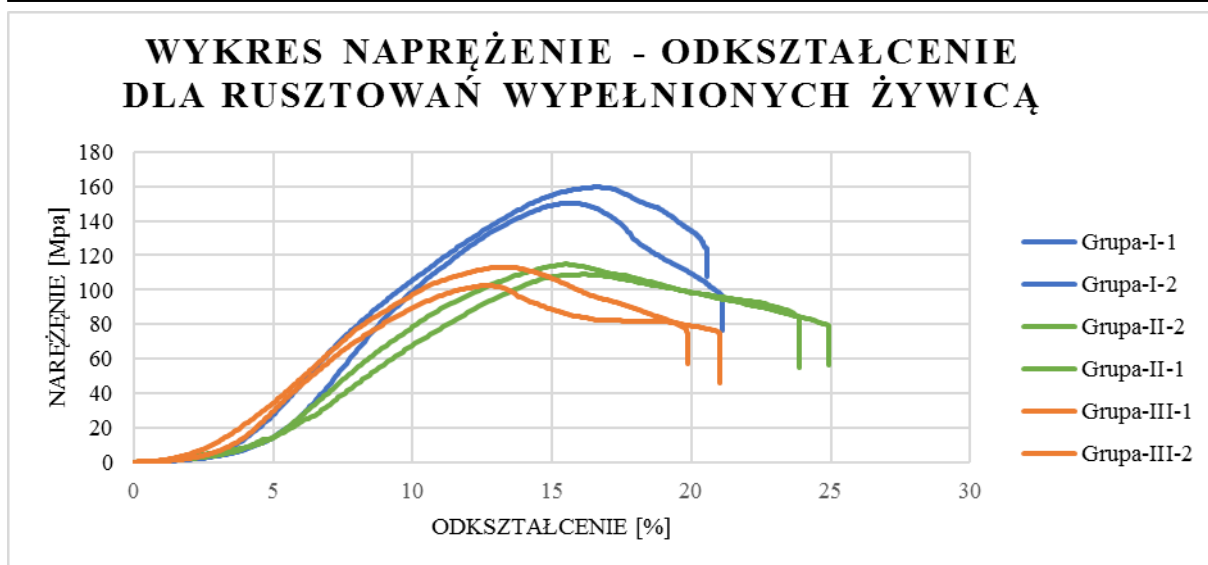
Grupa	Rodzaj materiału	Średnia wytrzymałość na ściskanie (Mpa)
I	Rusztowanie SLM + Żywica poliestrowa	147,929
II	Rusztowanie SLM + Żywica poliestrowa + wypełniacz jako proszek żelaza	118,445
III	Rusztowanie SLM + Żywica poliestrowa + wypełniacz jako proszek kobaltu	111,930
IV	Żywica poliestrowa	95,497
V	Żywica poliestrowa + wypełniacz jako proszek żelaza	73,651
VI	Rusztowanie SLM + Żywica poliestrowa + wypełniacz jako proszek kobaltu	86,616



Rysunek 3.1. Wykres przedstawiający wyniki wytrzymałości na ściskanie badanych kompozytów

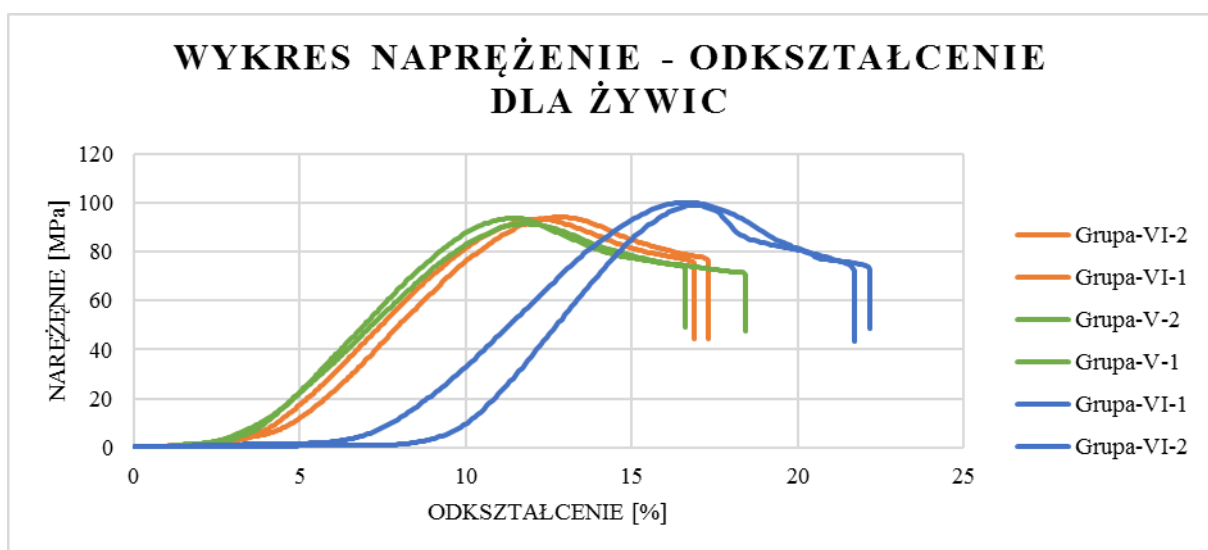
Figure 3.1. The compressive strength of investigated composites

Na podstawie powyższego rysunku można stwierdzić, że najwyższą wytrzymałością na ściskanie cechuje się kompozyt polimerowy z tytanowym rusztowaniem i żywicą poliestrową i wynosi ona 147,9 MPa. Z kolei najniższą wartość uzyskał element z żywicy z dodatkiem proszku Co – 73,6 MPa. Ponadto można stwierdzić, że dodatek proszku Co i Fe wpływa negatywnie na wytrzymałość na ściskanie kompozytów. Wartość wytrzymałości na ściskanie scaffoldu tytanowego wypełnionego samą żywicą wynosi 147,929 natomiast po dodaniu proszku Co wartość ta spada do 118,445 MPa. Podobnie w przypadku proszku Fe, jego obecność powoduje zmniejszenie wytrzymałości kompozytu na ściskanie, która wynosi 111,930 MPa. Może to świadczyć o większej ilości wad występujących w osnowie po dodaniu do niej wypełniacza w postaci proszku (np. pęcherzy powietrza lub słabej adhezji powierzchni proszków). Tytanowe rusztowanie ma duży wpływ na wytrzymałość na ściskanie kompozytu, co pokazuje tendencję, że przy połączeniu żywicy z rusztowaniem otrzymuje się własność wyższą niż poszczególnych składników.



Rysunek 3.2. Wykres naprężenie – odkształcenie dla kompozytów z rusztowaniem drukowanych techniką SLM

Figure 3.2. Stress - strain of composites reinforced by titanium scaffolds



Rysunek 3.3. Wykres naprężenie – odkształcenie dla kompozytów bez rusztowaniem drukowanych techniką SLM

Figure 3.3. Stress - strain for composites reinforced by titanium scaffolds

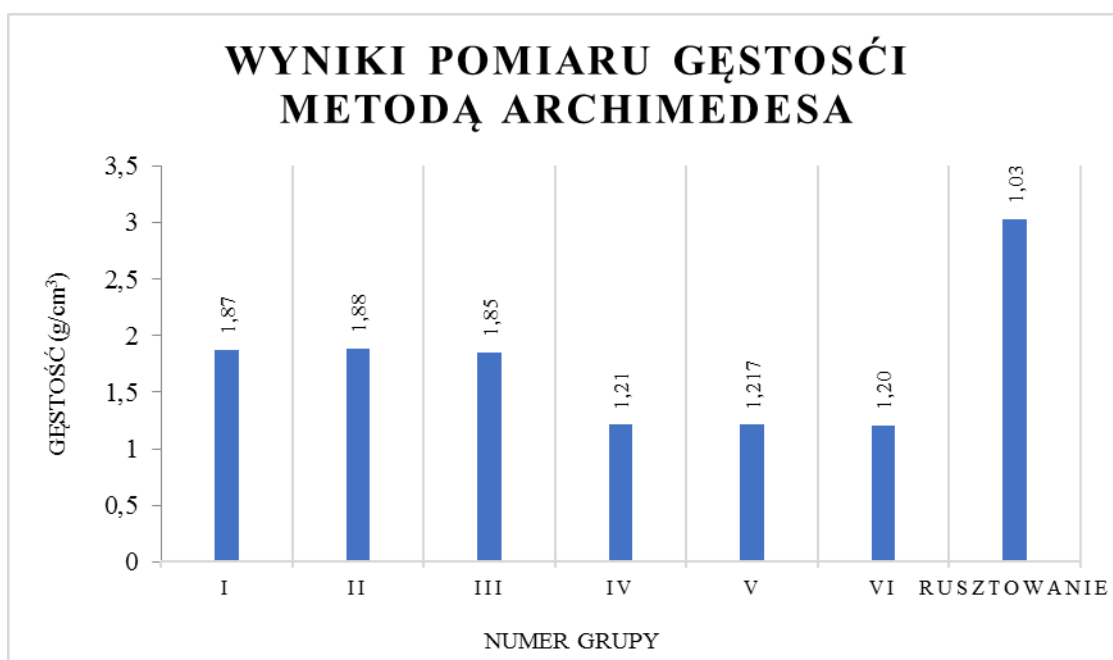
Na podstawie powyższych wykresów (rys. 3.2 i 3.3.) można stwierdzić, że zarówno kompozyty wzmacniane rusztowaniem jak i te bez rdzenia tytanowego ulegają gwałtownemu zniszczeniu. W najmniejszym stopniu dzieje się to w przypadku kompozytu wzmacnianego SLM z samej żywicy. Wyraźnie lepsze wartości osiągają grupy kompozytów nie zawierających wzmocnień w postaci proszków. Odpowiednio kompozyty wzmacniane proszkami i rusztowaniem oraz żywice wzmacniane proszkami posiadają generują podobne wykresy naprężenie-odkształcenie.

Wyniki badania gęstości kompozytów polimerowych wzmocnionych tytanowymi skafoldami wytworzone techniką SLM oraz próbek porównawczych z żywicy i proszków zostały przedstawione w tabelicy 5. Aby zobrazować otrzymane wyniki badania sporządzono wykres przedstawiony na rysunku 3.4.

Tablica. 5. Wyniki pomiarów gęstości metodą Archimedeasa dla poszczególnych grup kompozytów

Table 5. Density measurements by Archimedes for particular groups of composites

Grupa	Rodzaj materiału	Gęstość (g/cm ³)
I	Rusztowanie SLM + Żywica poliestrowa	1,873
II	Rusztowanie SLM + Żywica poliestrowa + wypełniacz jako proszek żelaza	1,886
III	Rusztowanie SLM + Żywica poliestrowa + wypełniacz jako proszek kobaltu	1,855
IV	Żywica poliestrowa	1,210
V	Żywica poliestrowa + wypełniacz jako proszek żelaza	1,217
VI	Rusztowanie SLM + Żywica poliestrowa + wypełniacz jako proszek kobaltu	1,208
brak	Rusztowanie	3,028



Rysunek 3.4. Wykres przedstawiający wyniki gęstości próbek

Figure 3.4. Density of investigated composite materials

Z przeprowadzonych badań pomiaru gęstości wynika, że najwyższą gęstość posiada samo rusztowanie tytanowe, wynosi ona 3,028 g/cm³, natomiast najniższą gęstością cechują się próbki składające się z samej żywicy albo z żywicy z proszkami (waha się ona od 1,208 do

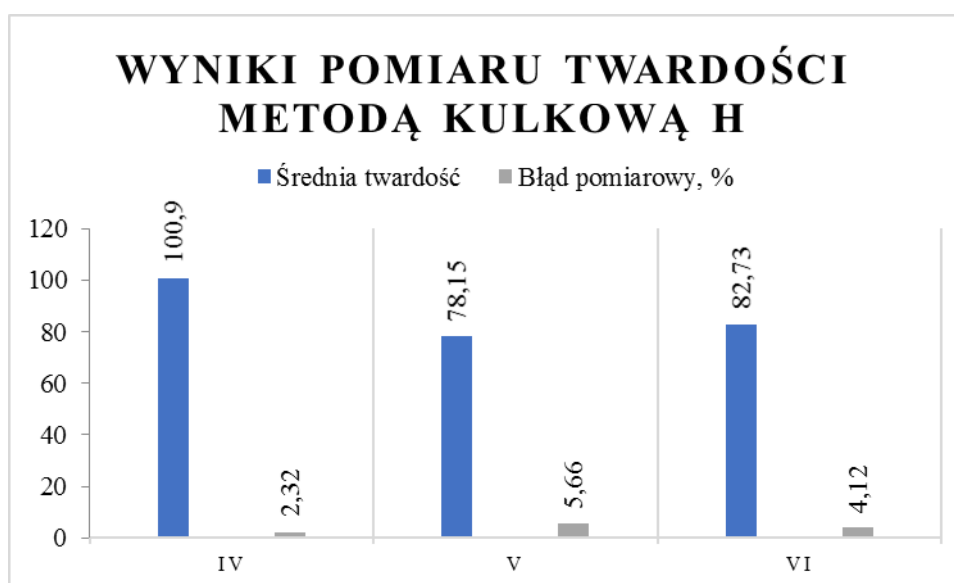
1,217 g/cm³). Połączenie tytanowego rusztowania oraz żywicy z proszkami daje wyniki gęstości zawierające się pomiędzy wynikami gęstości próbek bez obecnego scaffoldu i próbką składającą się jedynie z niego. Wyniki te pokazują, że obecność tytanowego rusztowania wpływa na wzrost gęstości próbki. Proszki Fe i Co z kolei nie wykazują większego wpływu na zmianę gęstości próbki.

W celu porównania twardości żywic z dodatkami proszków przeprowadzono badanie metodą Kulkową H. Wynik badania przedstawiono na poniższym schemacie (rys. 3.5).

Badania twardości przeprowadzono na próbkach wykonanych z żywicy w celu sprawdzenia jaki wpływ na tą własność ma dodatek proszków. Wyniki przedstawiono w tablicy 6 oraz na schemacie 3.5.

Tablica 6. Wyniki pomiaru twardości przeprowadzone metodą Kulkową
Table 6. Results of hardness measurement

Grupa	Rodzaj materiału	Średnia twardość, N/mm ²	Błąd pomiarowy H
V	Żywica poliestrowa + wypełniacz jako aluminium	100,9	2,735
VI	Rusztowanie SLM + Żywica poliestrowa + wypełniacz jako włókna węglowe	78,15	2,551
VI	Rusztowanie SLM + Żywica poliestrowa + wypełniacz jako włókna węglowe	82,73	1,489



Rysunek 3.5. Wykres przedstawiający wyniki twardości próbek
Figure 3.5. Hardness of investigated composite materials

Z przeprowadzonych badań pomiaru twardości metodą kulkowa H wynika, że najwyższą twardość posiada próbka składająca się z samej żywicy, wynoszącą średnio 101 N/mm^2 . Pokazuje to, że dodanie proszków zarówno Fe jak i Co powoduje spadek twardości, a nie jej wzrost. Twardość próbki z żywicą i dodatkiem Fe wynosi około 78 N/mm^2 , natomiast próbki z żywicą i proszkiem Co nieznacznie więcej: ok. 82 N/mm^2 . Wartość błędu pomiarowego wynosi poniżej 3 dla wszystkich trzech próbek, co pokazuje, że pomiary wykonane podczas badania są bardzo dokładne.

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W wyniku wykonanych badań stwierdzono, że dokładność infiltracji i rozmieszczenia proszków ma ogromny wpływ na własności kompozytów. W kompozytach ze szkieletem drukowanym techniką SLM występuje znacznie większa odporność. Występowanie skafoldu powoduje również wzrost gęstości całego kompozytu wytworzonego metodą SLM.

Kompozyty wzmacniane rdzeniem tytanowym cechują się również znacznie większą odpornością na ściskanie, w porównaniu do próbek wytwarzanych z samej żywicy i proszków metali.

Połączenie techniki SLM z infiltracją pod ciśnieniem, pozwala na wytworzenie nowoczesnych lekkich kompozytów o własnościach lepszych, niż jego pojedyncze składniki. Dzięki próbom tworzenia lekkich rdzeni, o wysokich własnościach na ściskanie i zginanie oraz próbą doboru odpowiedniej osnowy i jej wzmacniaczy, możliwym jest stworzenie materiału, który połączy trzy najbardziej pożądane cechy: lekkość konstrukcji, wytrzymałość na obciążenia oraz wysoką plastyczność.

LITERATURA

- [1] Rajczyk Marlena, Stachecki Bartłomiej, Współczesne materiały kompozytowe - wybrane kierunki rozwoju nowych technologii, Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym, Politechnika Częstochowska, 2011, s. 202-2011.
- [2] Hyla I., Śleziona J., Kompozyty elementy mechaniki i projektowania, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2004.
- [3] Ashby M.F., Jones D.R.H., Materiały Inżynierskie. Tom 1, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1995.
- [4] Murr L., Gaytan S., Ramirez D., Martinez E., Hernandez J., Amanto K., Shindo P., Medina F., Wicker R., Metal Fabrication by Additive Manufacturing Using Laser and Electron Beam Melting Technologies, Journal of Materials Science & Technology 2012, 2014, s. 1-14.
- [5] Cambell I., Bourell D., Gibson I., Additive manufacturing: rapid prototyping comes of age, Rapid Prototyping Journal, Vol. 19, 2012, s.353-364.
- [6] Budzik G., Pająk D., Magniszewski M., Budzik W., Metody szybkiego prototypowania, Stal - Me-tale & Nowe Technologie 1-2,2011, s 78-79.
- [7] <http://www.wadim.com.pl/> [online] 08 lutego 2017.
- [8] www.researchgate.net [online] 08 lutego 2017.
- [9] Van Bael S., Chai Y.C., Truscetto S., Moesen M., Kerckhofs G. Van Oosterwyck H., Kruth J., Schronnten J., The effect of pore geometry on the in vitro biological behavior of human periosteum-derived cells seeded on selective laser-melted Ti6Al4V bone scaffolds, Acta Biomaterialia, Vol. 8, 2012, s. 2824-2834.

- [10] Ginson Ian., Rosen David, Stucker Brent, Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing, Springer, Atlanta, 2015.
- [11] www.lanl.gov/projects/national-security-education-center/institute-for-materials-science/_assets/docs/am15-presentations/Tuck-Christopher-Presentation-Slides-Speaker.pdf [online] 08 lutego 2017.
- [12] Vrancken B., Thijs L., Kruth J.-P., Van Humbeeck J., Heat treatment of Ti6Al4V produced by Selective Laser Melting: Microstructure and mechanical properties, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 541, 2012, s. 177–185.
- [13] Huang Q., Liu X., Yang X., Zhang R., Shen Z., Feng Q., Specific heat treatment of selective laser melted Ti–6Al–4V for biomedical applications, *Frontiers of Materials Science*, Vol. 9, 2015, s. 373 – 381.
- [14] Kłosowska-Wołkiewicz Z., Penczek P., Królikowski W., Czub P., Pielichowski J., Ostrysz R., *Nienasycone żywice poliestrowe*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2010

