

Wytrzymałość na zginanie kompozytów polimerowych wzmocnianych tytanowymi skafoldami wytworzonymi techniką SLM

A. Skrzypczyk^a, K. Topolska^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:

Celem badań było określenie wytrzymałości na zginanie oraz energii kompozytów wytwarzanych za pomocą technologii przyrostowych z użyciem selektywnego przetapiania laserowego SLM (ang. Selective Laser Melting). Model zaprojektowany został w kształcie prostopadłościanu o wymiarach 60x10 mm o geometrii wypełnienia w kształcie plastra miodu, następnie zapisany w formacie STL, podzielony na warstwy i wydrukowany ze stopu Ti6Al4V. Po wydrukowaniu rdzenia i ulepszeniu cieplnym, struktury porowate poddano infiltracji żywicą poliestrową wzmocnioną proszkami. Tak wykonane próbki zostały poddane badaniu trój – punktowego zginania.

Abstract:

The aim of the study was to determine the bending strength and breaking energy of samples obtained by additive technology by selective laser melting SLM. The model was designed in shape of a cuboid and made in geometry honeycomb, then saved in STL format, separated into layers and made of the alloy of titanium Ti6Al4V. After printing the core and heat treatment, the scaffolds were subjected to infiltration by polyester resin reinforced with the powder. The models were examined research three-point bending.

Keywords: selektywne przetapiania laserowe, kompozyty polimerowe, wytrzymałość na zginanie, energia łamania

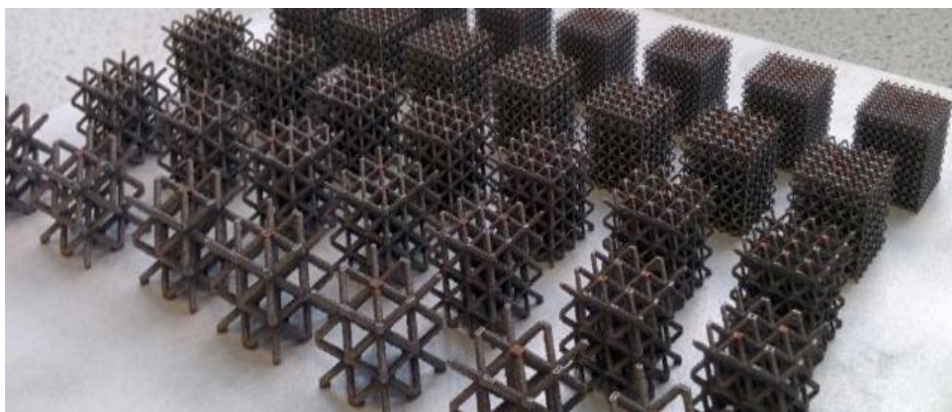
1. WSTĘP

Świat, w którym żyjemy zmienia się z dnia na dzień, a wraz z nim przemianie ulegają przedmioty codziennego użytku oraz te stosowane w różnych dziedzinach przemysłu. Otaczające nas obiekty tworzone są z surowców naturalnych oraz różnych materiałów

inżynierskich, do których zaliczamy metale i ich stopy, tworzywa sztuczne, ceramikę oraz kompozyty. Najbardziej pożądanymi przez użytkowników cechami powstających produktów jest ich wydajność i ekonomiczność, a progi tych własności podnoszone są wraz z ewolucją rynku. Aby spełniać stawiane parametry dotyczące stosowanych materiałów, w rozwoju inżynierii materiałowej dąży się do otrzymania nowych tworzyw, których własności będą stały na jednolicie wysokim poziomie, w różnych aspektach: własności mechaniczne, chemiczne, technologiczne, itd. Właściwym wydaje się być rozwój, w kierunku generowania materiałów, które łączą w sobie wysokie własności wytrzymałościowe ze znaczną odpornością na odkształcenia plastyczne oraz niską wagą [1, 2].

Dzięki najmłodszej grupie materiałów inżynierskich, jaką są kompozyty, wydaje się być możliwe osiągnięcia tych wymagań. Dobór materiałów spełniających najbardziej rygorystyczne wymagania, stawiane nowoczesnym materiałom poprzez tworzenie kompozytów, łączy w sobie zalety materiałów wyjściowych, tworząc z nich element o wyższych własnościach [2, 3].

Nowością w tworzeniu kompozytów jest tworzenie rusztowań wytwarzanych innowacyjnymi technikami przyrostowymi pozwalającymi na tworzenie niestandardowych elementów (rys. 1.1). Oprócz zalet takich jak swoboda projektowania, produkcja bez użycia narzędzi, czy skrócenie czasu wprowadzenia produktu na rynek, metoda posiada liczne wady. Główną wadą jest jakość powierzchni, która silnie zależy od orientacji elementu drukowanego oraz parametrów procesu, jednak należy zwrócić uwagę na ciągły rozwój, minimalizację wad i doskonalenie tego kierunku. I właśnie tutaj pojawia się możliwość tworzenia kompozytów z użyciem druku 3D, które mogą pozwolić na minimalizację wad rusztowań i stworzenie elementu o pożądanym własnościach [3].



Rysunek 1.1. Elementy drukowane techniką SLM [4]
Figure 1.1. Elements printed by additive technology SLM

Metoda SLM, czyli selektywne stapianie (przetapianie) materiałów proszkowych wiązką lasera, została opatentowana w 1992 roku na University of Texas i jest prężnie rozwijana przez wiele firm do dnia dzisiejszego [3-6].

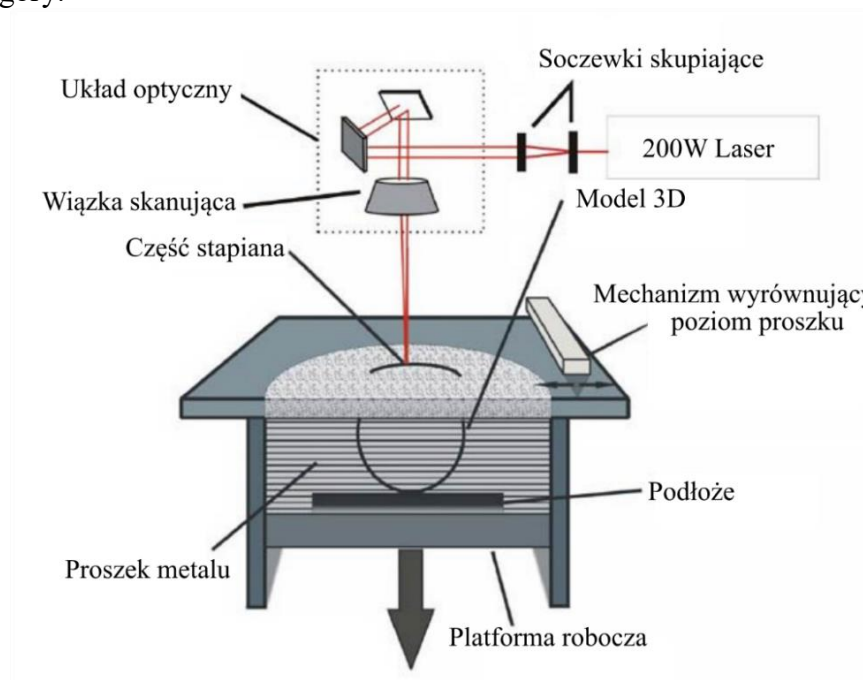
Jest to technika wytwarzania elementów z dowolnych materiałów, które muszą odznaczać się specjalnymi własnościami - to znaczy, że muszą być to tworzywa dające się sproszkować, a następnie stopić. Najczęściej stosowane są proszki wytwarzane ze stali nierdzewnych, czystego tytanu i jego stopów, jak również stopy niskotopliwe. Swoje zastosowanie znajdują tutaj również stopy cynku, miedzi, stal narzędziowa, tlenki aluminium oraz węgiel krzemowy. Do selektywnego przetapiania stosuje się proszki wysokiej czystości, które po całkowitym

przetopieniu tworzą produkty o bardzo wysokiej gęstości, utrzymującej się na poziomie 99,6%, a nawet zbliżającej się do 99,9%. Maszyny ze względu na zastosowane laserów o dużej mocy są drogie w zakupie i eksploatacji (w odniesieniu do metody SLS) [1, 6-8].

Elementy uzyskiwane tą metodą są trwałe i wytrzymałe, a przede wszystkim niewiele różnią się od produktów wytworzonych tradycyjnymi technikami kształtowania. Dzięki temu, komponenty po krótkiej obróbce wykańczającej znajdują zastosowanie jako elementy maszyn i urządzeń. Przeznaczenie odnajdują w produkcji małoseryjnej i jednostkowej w dziedzinach takich jak: motoryzacja, rekonstrukcja, medycyna, przemysł zbrojeniowy i chemiczny, lotnictwo, a nawet przemysł kosmiczny. Największą zaletą metody SLM jest niewątpliwie zdolność wytworzenia elementu o skomplikowanej geometrii lub strukturze, jak na przykład konfiguracja plastra miodu, którego produkcja innymi metodami jest niemożliwa lub bardzo kosztowna [6].

Etapy druku 3D na maszynie do Selektynego Spiekania Materiałów (rys. 1.2.) przebiega w następujących etapach [1, 6-8]:

- 1) Laser oraz przestrzeń robocza znajduje się w komorze, w której poziom tlenu obniżany jest przez przepływ gazu obojętnego (najczęściej w postaci argonu lub azotu) do poziomu poniżej 0,2%, w celu ochrony przed utlenieniem proszku, nad czym kontrolę sprawuje operator.
- 2) Warstwa proszku jest równomiernie rozkładana na platformie roboczej, a następnie wyrównywana przez specjalnie zintegrowany system.
- 3) Wiązka lasera o dużej mocy skupiana, przez układ optyczny, kierowana jest na powierzchnię proszku, skanując według geometrii otrzymanych z danych CAD i powoduje topienie się proszku oraz jego łączenie się materiału w całość.
- 4) Platforma robocza zostaje obniżona o grubość jednej warstwy.
- 5) Etapy zostają powtarzane, aż do momentu otrzymania pełnego modelu. Część powstaje od dołu do góry.



Rysunek 1.2. Schemat przedstawiający zasadę procesu SLM
 Figure 1.2. Scheme of Selective Laser Sintering machine

Podczas tworzenia kolejnych warstw w procesie selektywnego stapiania proszku, laser działa w dwóch etapach tworząc geometrię danej warstwy [1]:

- 1) Tworzone zostają granice przetapianego kształtu.
- 2) W obszarze wyznaczonym przez granice następuje przetopienie wypełnienia.

Parametry procesu uzależnione są od czterech grup wymogów (tab. 1), których odpowiednie dobranie zbliża do otrzymania elementu, o dobrej jakości powierzchni oraz własnościach użytkowych. W wielu instytutach badawczych prowadzone są obserwacje nad zachowaniem drukowanego elementu przy zmiennych parametrach, prowadzące do polepszenia własności otrzymywanych części.

Tablica 1. Parametry dobierane podczas procesu SLM [3, 6, 7]

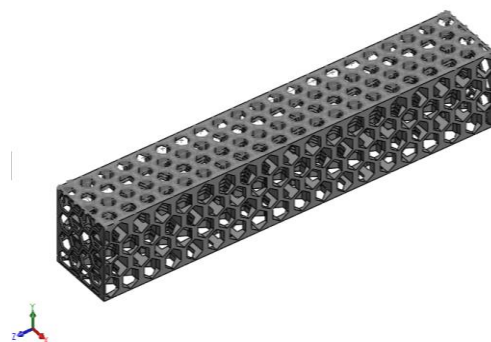
Table 1. The parameters selected during the process of SLM

Material	Laser	Skanowanie	Środowisko
Rodzaj materiału	Tryb	Szybkość skanowania	Podgrzewanie
Morfologia proszku	Długość fali	Grubość warstwy	Ciśnienie
Rozmiar ziaren proszku	Częstotliwość	Sektor skanowania	Poziom tlenu
Właściwości termiczne	Wielkość plamki	Kierunek skanowania	Rodzaj gazu ochronnego
Lejność		Odległość między pulsami skanera	

2. MATERIAŁ I METODYKA BADAŃ

Proces tworzenia tytanowego skafoldu rozpoczęto od zaprojektowania go w oprogramowaniu CAD (rys. 2.1), w kształcie prostopadłościanu o wymiarach 10x10x60 mm z wypełnieniem w kształcie plastra miodu. Następnie wygenerowany model wydrukowano techniką SLM ze stopu tytanu Ti6Al4V na urządzeniu AM 125 - Firmy Renishaw oraz zbadano poprawność wydruku z wykorzystaniem świetlnego mikroskopu stereoskopowego Discovery V12. Tak otrzymane rusztowania poddano obróbce cieplnej przez wyżarzanie w temperaturze 850°C przez 2 h w środowisku obojętnym – argonie.

W celu otrzymania kompozytów z rusztowaniem porowatym tytanowym, wydruki infiltrowano żywicą poliestrową wraz z dodatkami proszków wzmacniających, a następnie gotowe próbki podano badaniu wytrzymałości na zginanie. Żywicę infiltrowano do próbek w wyniku wytworzenia podciśnienia w specjalnie stworzonych do tego formach, co pozwoliło na minimalizację defektów w postaci pęcherzy powietrza. Wytworzono 3 rodzaje kompozytów (tab. 2, rys. 2.2.a). W celu możliwości porównania własności kompozytów z żywicą poliestrową do własności samej żywicy lub żywicy z wypełniaczem, utworzono kolejne trzy grupy próbek (tab. 2, rys. 2.2.b).



Rysunek 2.1. Gotowy skafold wydrukowany techniką SLM
Figure 2.1. Prepared scaffold printed technology SLM

Tablica 2. Rodzaje wytworzonych próbek
Table 2. Types of manufactured samples

Grupa	Ilość próbek	Rodzaj kompozytu
I	1	Rusztowanie SLM + Żywica poliestrowa
II	2	Rusztowanie SLM + Żywica poliestrowa + wypełniacz jako aluminium
III	2	Rusztowanie SLM + Żywica poliestrowa + wypełniacz jako włókna węglowe
IV	2	Żywica poliestrowa
V	2	Żywica poliestrowa + wypełniacz jako aluminium
VI	2	Rusztowanie SLM + Żywica poliestrowa + wypełniacz jako włókna węglowe



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

Próbki, zarówno te stanowiące kompozyty polimerowe, jak i żywicę poliestrową wzmocnianą proszkami zostały poddane zginaniu trój – punktowemu, z którego otrzymano informacje na temat wytrzymałości na zginanie, zależności naprężenie – odkształcenie, a także energię łamania poszczególnych próbek. Pomiary te zostały przeprowadzone na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej Zwick model Z020, przy odległości między podporami 30 mm i szybkości badania 0,008 l/mm. Każdą próbkę ustawiono na podporach

zgodnie z kierunkiem drukowania, a następnie za pomocą programu sterowanego komputerowo wykonywano badanie. Przeprowadzona próba oparta była na normie ISO 178:2001, dotyczącej oznaczania właściwości przy zginaniu.

3. WYNIKI BADAŃ

Po wydrukowaniu rusztowań tytanowych analizowano ich poprawność wymiarową w stosunku do projektu komputerowego za pomocą mikroskopu świetlnego. Przedstawione zdjęcia (3.1) pozwalają zauważyć, że różnica między wydrukiem, a projektem komputerowym jest stosunkowo niewielka: wynosi w najgorszym wypadku 0,03mm i może być spowodowana niedokładnością pomiarową na powyższych zdjęciach.

Rysunek 3.1. Zdjęcia mikroskopowe struktur porowatych, wydrukowane metodą SLM, w celu sprawdzenia poprawności wymiarowej; a) wielkość oczka przy powiększeniu x15, b) wymiar ścianki łączącej pory przy powiększeniu x25

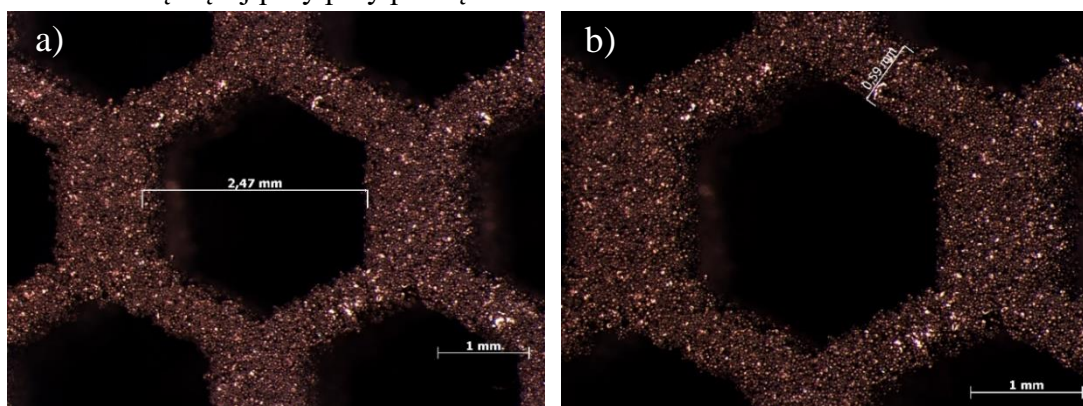


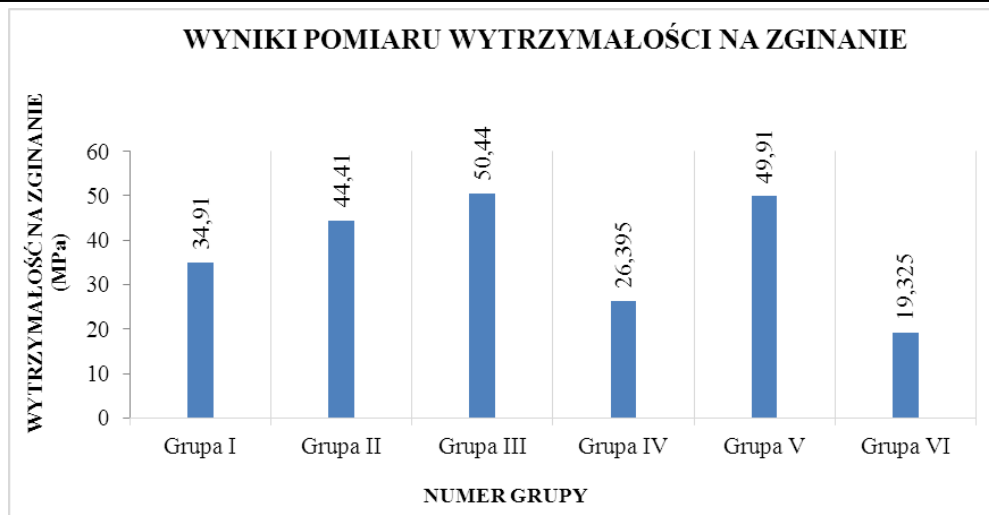
Figure 3.1. Microscopic pictures of porous structure, printed SLM, to validate dimensional, a) value of eyelet, zoom x15 b) dimension of the connecting wall, zoom x25,

Przeprowadzona próba zginania pozwoliła na wyznaczenie wytrzymałości na zginanie (tab. 3), które przedstawiono w celu lepszego zobrazowania w postaci wykresu słupkowego (rys. 3.2.). Dodatkowo umożliwiło to wygenerowanie wykresów naprężenie – odkształcenie (rys. 3.3. i 3.4.) oraz energii łamania (tab. 4, rys. 3.5.).

Tablica. 3. Wyniki wytrzymałości na zginanie.

Table 3. The results of flexural strength

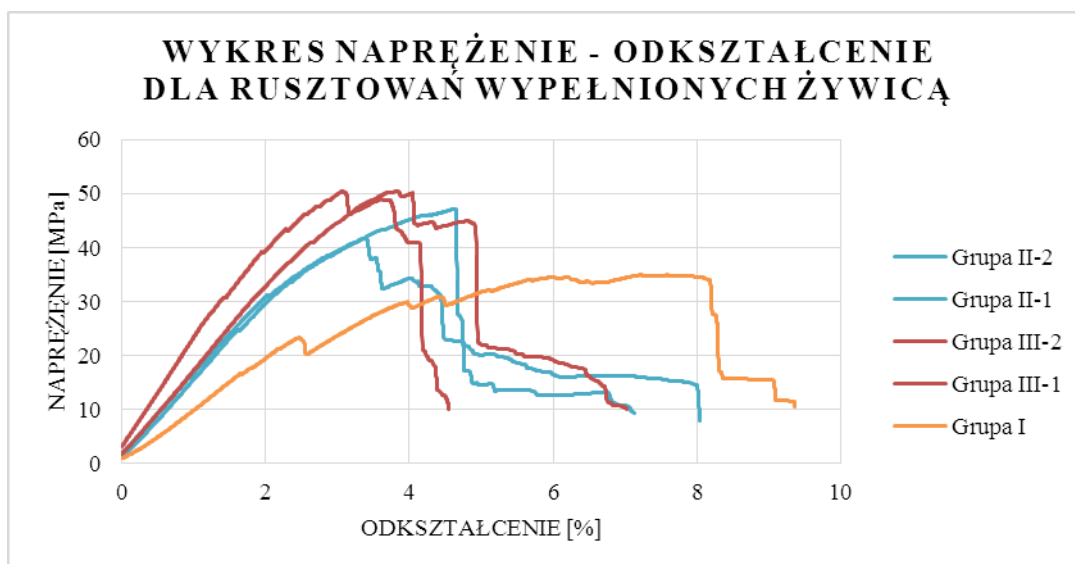
Grupa	Rodzaj materiału	Średnia wytrzymałość na zginanie (Mpa)
I	Rusztowanie SLM + Żywica poliestrowa	34,91
II	Rusztowanie SLM + Żywica poliestrowa + wypełniacz jako aluminium	44,41
III	Rusztowanie SLM + Żywica poliestrowa + wypełniacz jako włókna węglowe	50,44
IV	Żywica poliestrowa	26,395
V	Żywica poliestrowa + wypełniacz jako aluminium	49,91
VI	Rusztowanie SLM + Żywica poliestrowa + wypełniacz jako włókna węglowe	19,325



Rysunek 3.2. Wykres przedstawiający wyniki wytrzymałości na zginanie
 Figure 3.2. Graph showing the results of flexural strength

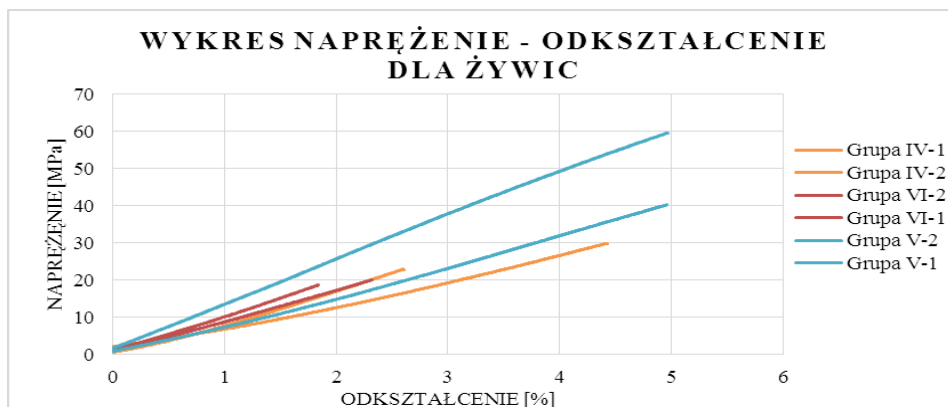
Próbki z grupy I i III z rusztowaniem drukowanym techniką SLM, w porównaniu do swoich odpowiedników bez struktury porowatej, wykazują znacznie większą wytrzymałość na zginanie, kolejno w przybliżeniu 35 i 50 MPa do 26 i 19 MPa. Próbki ze wzmocnieniem proszkiem aluminium – ze strukturą porowatą oraz bez niej, wykazują podobne wyniki badania wytrzymałości na zginanie, co może być spowodowane nie prawidłowym wykonaniem próbek do badań. Dodatki proszku do próbek z tytanowym rusztowaniem, w dużym stopniu poprawiają wytrzymałość na zginanie, z wartości 35 MPa do 44,41 MPa dla proszku aluminium (o 22 %) oraz nawet do 50,44 dla proszku włókien węglowych (o 41 %).

Prawidłowym wydaje się być stwierdzeniem, że próbki bez struktury porowatej nie zostały wykonane w prawidłowy sposób i po odpowiednim ich przygotowaniu, wyniki znacznie odbiegałyby od tych otrzymanych powyżej.



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

Figure 3.3. Chart stress – strain for sample composites with scaffold



Rysunek 3.4. Wykres naprężenie – odkształcenie dla kompozytów bez rusztowania drukowanego techniką SLM

Figure 3.4. Chart stress – strain for sample composites without scaffold

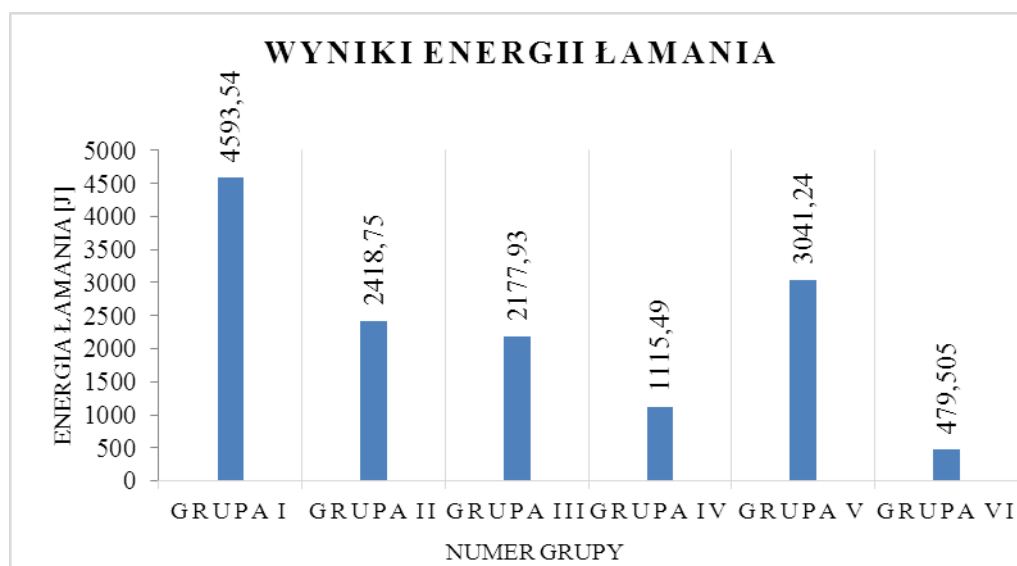
Na podstawie wykresów można stwierdzić, że kompozyty wzmocnione rusztowaniem nie ulegają gwałtownemu zniszczeniu, lecz pękaniu, w przeciwieństwie do próbek bez wzmocnień tytanowych. Jest to widoczne na wykresach kompozytów wzmocnianych skafoldami w postaci chwilowych spadków naprężenia, same żywice natomiast ulegają gwałtownym zniszczeniom widocznym w postaci zerwań.

W kompozytach z rusztowaniem drukowanym SLM, próbka z infiltrowaną samą żywicą osiąga największe odkształcenie (najlepsze własności plastyczne), ale dzieje się to przy stosunkowo niskim naprężeniu. Próbki infiltrowane żywicą wzmocnianą proszkami osiągają mniejsze odkształcenie lecz dzieje się to przy wysokich wartościach naprężenia. W kompozytach bez rusztowań drukowanych SLM, próbka składająca się z samej żywicy odnotowuje najniższe odkształcenie przy równie niskim naprężeniu. Dodatek proszków zwiększa odkształcenie próbki, które najlepsze własności osiąga w kompozytach z dodatkiem aluminium. Pokazuje to, że dodatek proszków wpływa na zwiększenie własności wytrzymałości na zginanie w obu przypadkach – zarówno próbki z rusztowaniem jak i bez niego.

Tablica 4. Wyniki energii łamania.

Table 4. The results of the energy breaking

Grupa	Rodzaj materiału	Średnia Energia łamania [J]
I	Rusztowanie SLM + Żywica poliestrowa	4593,54
II	Rusztowanie SLM + Żywica poliestrowa + wypełniacz jako aluminium	2418,75
III	Rusztowanie SLM + Żywica poliestrowa + wypełniacz jako włókna węglowe	2177,93
IV	Żywica poliestrowa	1115,49
V	Żywica poliestrowa + wypełniacz jako aluminium	3041,24
VI	Rusztowanie SLM + Żywica poliestrowa + wypełniacz jako włókna węglowe	479,505
VI	Rusztowanie SLM + Żywica poliestrowa + wypełniacz jako włókna węglowe	19,325



Rysunek 3.5. Wykres przedstawiający wyniki energii łamania

Figure 3.5. A graph showing the results of the energy break

Największą energią łamania, która przyjmuje wartość 4593 J, odznacza się kompozyt polimerowy z rusztowaniem tytanowym. Pozostałe kompozyty z rdzeniem drukowanym SLM również osiągają wysokie wartości, rzędu 2418 J dla próbki z proszkiem aluminium oraz 2177 J z proszkiem włókien węglowych. W grupie bez struktur porowatych, kolejny raz widoczne są niezgodności wynikowe. Sama żywica i żywica z proszkiem włókien węglowych przyjmują stosunkowo niskie wartości. Żywica z proszkiem aluminium, odznacza się wartością wyższą od kompozytów z rdzeniem tytanowym i wypełniaczami. Porównując kompozyty z rdzeniem tytanowym, do ich odpowiedników (nie biorąc pod uwagę kompozytów z proszkiem aluminium), wykazują one o wiele wyższe energie łamania, gdzie różnica w przypadku samej żywicy wynosi 3478 J.

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W wyniku wykonanych badań stwierdzono, że dokładność infiltracji i rozmieszczenia proszków ma ogromny wpływ na właściwości kompozytów. Dodatek proszków do kompozytów z rdzeniem SLM poprawia wytrzymałość na zginanie oraz obniża energie łamania i powoduje największe odkształcenia kompozytów.

W przypadku badania wytrzymałości na zginanie rusztowanie pozwoliło ograniczyć nagłe zerwania, a łamanie zachodziło w sposób powolny, poprzez pęknięcia. Kontynuacja badań powinna zostać przeprowadzona w kierunku zoptymalizowania połączenia dwóch technik, mogących tworzyć kompozyt, o dużej wytrzymałości mechanicznej, dobrych właściwościach plastycznych i niskiej masie. Koniecznym jest wyeliminowanie błędów, wynikających z niedokładnego infiltrowania żywicy, powodujących powstawanie pęcherzy powietrza i niejednorodnego rozłożenia proszku w osnowie. Eksploracja powinna również dotyczyć wzmocnienia żywicy innymi wypełniaczami oraz tworzenia nowych geometrii rusztowań, charakteryzujących się jak największą wytrzymałością mechaniczną. Działania te mogą doprowadzić do wytworzenia nowoczesnych, lekkich kompozytów, łączących trzy najbardziej pożądane cechy: lekkość konstrukcji, wytrzymałość na obciążenia oraz wysoką plastyczność.

LITERATURA

- [1] Siemiński P., Budzik G., Techniki przyrostowe, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa, 2013.
- [2] Rajczyk M., Stachecki B., Współczesne materiały kompozytowe - wybrane kierunki rozwoju nowych technologii, Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym, Politechnika Częstochowska, 2011, s. 202-2011.
- [3] Gebhardt A., Hotter J., Ziebura D., Impact of SLM build parameters on the surface quality, 2014.
- [4] <http://www.news.com.au/> [online] 03 stycznia 2017.
- [5] 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.
- [6] Rajesh R., Sudheer S., Mithun V., Selective laser sintering process –a review, International journal of current engineering and scientific research (ijcesr), Vol. 2, 2015, s. 91 – 100.
- [7] Kruth J., Marceil P., Vaerenberg J., Froyen L., Rombouts M., Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting, Rapid Prototyping Journal, Vol. 11, 2005, s. 26 - 36.
- [8] www.ipk.fraunhofer.de [online] 03 stycznia 2017.