

Wpływ parametrów technologicznych FDM na własności wytrzymałościowe komponentów z PLA

K. Topolska^a, A. Skrzypczyk^b, M. Król^c

^a Student Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny
email: kat.topolska@gmail.com

^b Student Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny
email: a.skrzypczyk.a@gmail.com

^c Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny,
Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Zakład Technologii Procesów
Materiałowych, Zarządzania i Technik Komputerowych w Materiałoznawstwie
email: mariusz.krol@polsl.pl

Streszczenie: Celem pracy była analiza wpływu parametrów technologicznych na własności wytrzymałościowe elementów wytworzonych za pomocą techniki FDM z materiału PLA. Zastosowano trzy różne geometrie wypełnienia oraz trzy gęstości geometrii wypełnienia przy stałej grubości warstwy, średnicy dyszy oraz prędkości wydruku. Wpływ zmiennej geometrii wypełnienia na własności wytrzymałościowe elementów zbadano za pomocą statycznej próby rozciągania tworzyw sztucznych. Zaobserwowano wpływ zwiększonej gęstości wypełnienia na wartość maksymalnego naprężenia rozciągającego uzyskanego w próbach.

Abstract: The aim of the study was to define impact of technological parameters on mechanical properties of PLA elements made by FDM technology. The study used three different infill geometries and three density of infill. The layer height, extruder diameter and print speed were constant. The influence of variable infill geometry on mechanical properties was examined by tensile testing. As a result established a relation between increased infill density and maximal tensile value obtained during the research.

Słowa kluczowe: druk 3D, wytwarzanie przyrostowe, statyczna próba rozciągania

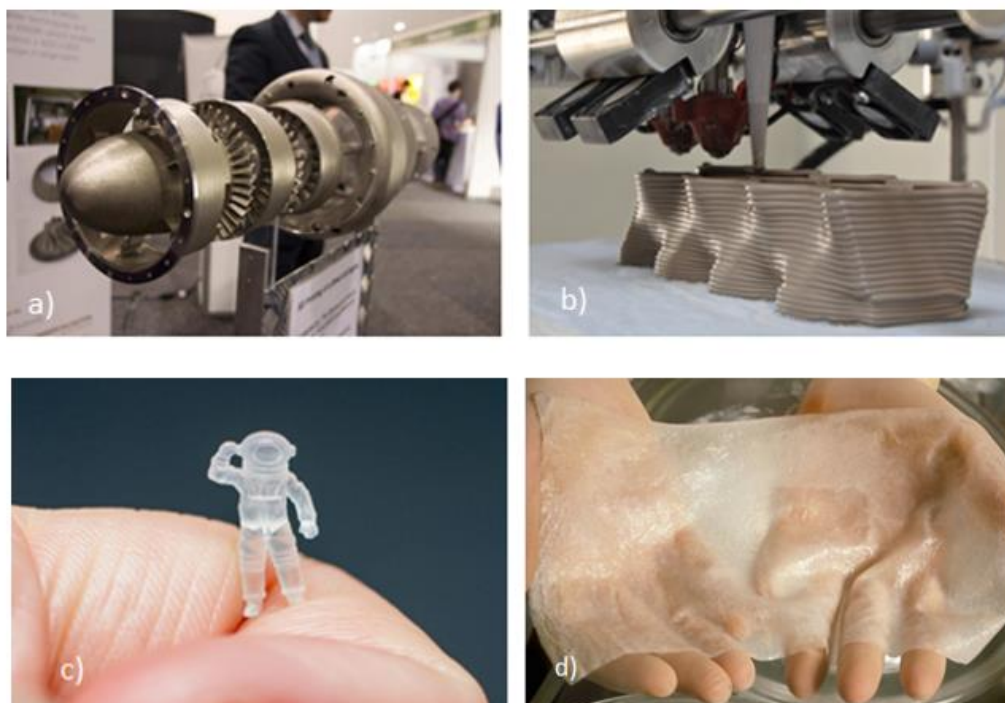
Key words: 3D print, additive manufacturing, tensile strenght test

1. WSTĘP

Druk 3D jako termin oraz technologia pojawił się w roku 1984 reprezentowany przez pierwszą technikę – SLA (ang. Stereolithography). Została ona opracowana przez Charles'a Hull'a, właściciela firmy 3D Systems, którego założeniem była możliwość wytwarzania fizycznych przedmiotów odwzorowanych za pomocą pliku cyfrowego. Ideą SLA było i stale jest wytwarzanie prototypów z wykorzystaniem fotopolimeru jako filamentu, który

w momencie nakładania go warstwa po warstwie jest utwardzany światłem lasera UV. W nawiązaniu do powyższego wynalazku, drugą, a zarazem bazową oraz integralną częścią, której kreatorem był również Ch. Hull jest rozszerzenie i forma zapisu pliku umożliwiające jego przestrzenną wizualizację i dalsze wytworzenie prototypów, a mianowicie STL. W związku z licznym zainteresowaniem nowo powstałą technologią przestrzennego wytwarzania bardzo szybko zaczęły pojawiać się jej alternatywne modyfikacje. Odpowiedzią na technikę SLA była technologia FDM (ang. Fused Deposition Modeling), której inauguracja miała miejsce w 1988 roku przez Scotta Crump'a z firmy Stratys [1,3].

Wytwarzanie przyrostowe (ang. Additive Manufacturing) jest to termin, który opisuje wszystkie technologie umożliwiające tworzenie modeli przestrzennych dzięki dodawaniu warstwa po warstwie wybranego materiału. W zależności od rodzaju technologii materiałem może być tworzywo sztuczne, metal, beton czy też wykorzystywane w transplamtologii tkanki ludzkiego ciała (rys. 1) [4].



Rysunek 1. Przykłady zastosowań poszczególnych materiałów w technologiach druku 3d: a) metalowa turbina b) wazy drukowane z betonu, c) miniaturowy wydruk polimerowy, d) próba wydruku ludzkiej skóry [5,6,7,8]

Figure 1. Exaples of applications each materials in 3D printing technologies: a) metal turbine, b) concrete vases, c) miniature polimer print, d) attempt to human skin print

Jako pojęcie AM najczęściej oznacza bezpośrednio technologie druku 3D, technikę szybkiego prototypowania (ang. Rapid Prototyping) oraz bezpośredniego wytwarzania wspomaganego cyfrowo (ang. Direct Digital Manufacturing). AM stało się narzędziem używanym nie tylko do wizualizacji projektów, ale również środkiem do tworzenia spersonalizowanych produktów dla konsumentów, narzędziem kreującym elementy przemysłowe jak i partie części produkcyjnych. Od roku 1984 opracowano kilkanaście metod przyrostowych. Wszystkie z nich łączy wspólna idea przyrostowego budowania elementów

opierająca się na tworzeniu rzeczywistego elementu w oparciu o wirtualną geometrię wytworzoną w systemie komputerowym. Obecnie do najbardziej popularnych metod kształtowania warstwowego zalicza się [1, 9,10]:

- SLA (ang. Stereolithography),
- SLS (ang. Selective Laser Sintering),
- MJM (ang. Multi Jet Modeling),
- SLM (ang. Selective Laser Melting),
- DLP (ang. Digital Light Processing),
- 3DP (ang. Three-Dimensional Printing),
- CLIP (ang. Continous Liquid Interface Production)
- FDM (ang. Fused Deposition Modelling).

W oparciu o dokładniejsze specyfikacje przedstawionych technologii oraz charakterystyki wytworzonych przez nie modeli dokonano ich porównania, którego wyniki przedstawiono w tablicy 1 [9, 10].

Tablica 1. Oceny porównawcze poszczególnych technik addytywnych na podstawie kryteriów związanych z wytwarzanymi prototypami jak i samym procesem wytwarzania [9, 10]

Table 1. The comparison of each additive techniques based on criterions connected with manufactured prototypes and mainly manufacturing process.

Kryterium porównawcze	Technologia AM						
	SLA	SLS	SLM	FDM	3DP	MJM	DLP
Dokładność wykonawcza (małe elementy)	wysoka	średnia	średnia	niska	niska	bardzo wysoka	wysoka
Gładkość powierzchni	średnia	średnia	niska	średnia	średnia	bardzo wysoka	wysoka
Tolerancja odwzorowania	wysoka	średnia	średnia	średnia	niska	wysoka	wysoka
Funkcjonalność (sprężystość/udarność)	średnia	wysoka	wysoka	bardzo wysoka	niska	niska	średnia
Wytrzymałość mechaniczna	średnia	wysoka	bardzo wysoka	wysoka	niska	średnia	średnia
Łatwość obróbki wykańczającej modelu	niska	średnia	niska	wysoka	średnia	bardzo wysoka	wysoka
Szacunkowy koszt wykonania prototypu	wysoki	bardzo wysoki	wysoki	średni	niski	wysoki	średni

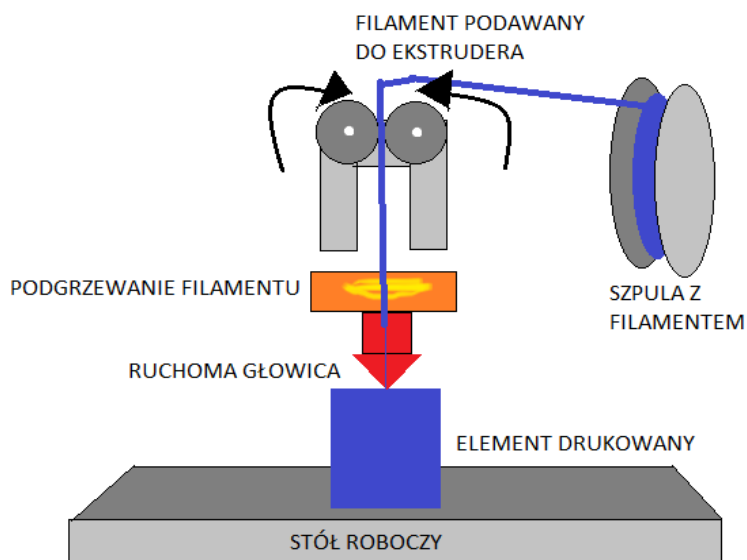
Na podstawie powyższych charakterystyk stwierdzono, iż najgorszymi wynikami charakteryzują się elementy wytworzone za pomocą technologii 3DP. W momencie gdy najważniejsze są detale projektu warto skupić się na technologii SLA, DJP lub MJM.

Z kolei jeżeli oczekiwaną własnością jest wytrzymałość mechaniczna należy skorzystać z technologii FDM, SLM lub SLS [9, 10].

2. TECHNOLOGIA FDM

FDM czyli Fused Deposition Modeling nazywana również często jako FFF czyli Fused Filament Fabrication jest najbardziej popularną i dostępną techniką druku 3D wykorzystującą termoplasty. W założeniu pierwotnym technologii stosuje dwa materiały docelowy- termoplast oraz podporowy- który po zakończeniu wydruku rozpuszcza się w specjalnie przygotowanym roztworze. Nazwa FDM jest zastrzeżona przez firmę Stratasys. W związku z ogromnym zainteresowaniem samą technologią zarówno wśród niskobudżetowych jak i wielkich koncernów na potrzeby handlowe stworzono nazwę FFF określającą tę samą technologię [1, 4, 11].

Ideą metody jest warstwowe budowanie elementu z materiału modelowanego przez rozgrzaną dyszę (rys. 2). Materiał z którego wykonać chcemy element nazywany jest filamentem i występuje w postaci żyłki nawiniętej na okrągłą szpulę. W trakcie procesu jest on ciągle rozwijany i wprowadzany za pomocą ekstrudera do rozgrzanej do ok. 190 – 280°C dyszy. Następnie materiał jest podgrzewany do postaci półpłynnej i kolejno nanoszony na stół roboczy w postaci bardzo cienkich warstw, które stygnąc formują wytwarzany model. Temperatury zarówno dyszy jak i stołu roboczego są kontrolowane przez aparaturę sterującą drukarkę. W najbardziej powszechnych rodzajach drukarek 3D stosowanych w technologii FDM/FFF wykorzystuje się tylko jedną głowicę. W związku z tym w przypadku gdy drukowany jest element w konstrukcji którego niezbędne jest użycie podpór wykonane są one z tego samego materiału co model docelowy. Aby ułatwić ich późniejsze usunięcie elementy podporowe posiadają strukturę która zmniejsza ryzyko uszkodzenia prototypu w momencie obróbki wykańczającej po zakończeniu procesu druku. [1, 2, 4, 10, 14].



Rysunek 2. Schemat ideowy; metoda FDM/FFF

Figure 2. FDM/FFF technology. Schema.

FDM jest technologią wykorzystującą szeroką gamę tworzyw termoplastycznych, które należą do jednej z grup materiałów inżynierskich, a mianowicie materiałów polimerowych. Twórca technologii FDM- firma Stratasys- w swoich urządzeniach wykorzystuje przede wszystkim materiały takie jak ABS, pochodne ABS oraz PC. Biorąc pod uwagę całą branżę druku 3D w technologii FDM do najczęściej używanych i zarazem najłatwiej dostępnych materiałów zalicza się ABS (akrylonitrylo-butadieno-styren) oraz PLA (polilaktyd) [2, 10].

ABS czyli akrylonitrylo-butadieno-styren jest materiałem polimerowym otrzymywanym w trakcie procesu polimeryzacji butadienu oraz kopolimeryzacji akrylonitrylu ze styrenem w trakcie z jednoczesnym szczepieniem wytworzonego kopolimeru na polibutadienie. Proces jego powstawania ma związek z późniejszym wydzielaniem się nieprzyjemnego zapachu w postaci szkodliwych oparów w momencie procesu podgrzewania i topnienia. Stosuje się go głównie jako elementy sprzętu sportowego, wewnętrzne wyposażenie samochodów oraz na elementy mebli czy zabawek [10, 12].

PLA- polilaktyd to polimer z grupy poliestrów alifatycznych. Wytwarzany za pomocą surowców naturalnych- między innymi z mączki kukurydzianej- dzięki czego jest traktowany jako materiał biodegradowalny. Z powodu na teoretycznie gorsze własności fizyczne jest on rzadziej wykorzystywany do produkcji przemysłowej od tworzywa ABS. Stosuje się go głównie w przemyśle biomedycznym czy też gospodarstwa domowego [10].

Oprócz wyżej wymienionych możliwe jest wykorzystanie tworzyw takich jak: PET, HIPS, TPU, ASA, PC, PA czy też materiałów gumopodobnych o wysokiej elastyczności. Do coraz bardziej popularnych materiałów o ciekawej charakterystyce zalicza się laywood (rys. 3) oraz laybrick, nylon a także bardzo nowe połączenie tworzywa PLA z materiałami metalowymi, które tworzą filamenty o nazwach Bronzefill czy Copperfill [10].

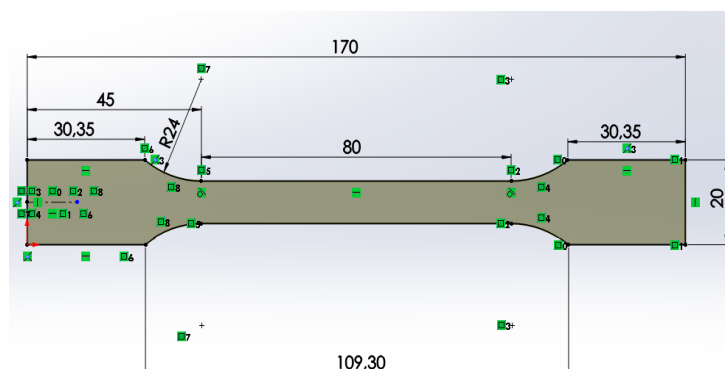


Rysunek 3. Wazon wytworzony z materiału laywood [13]

Figure 3. Vase made of laywood material

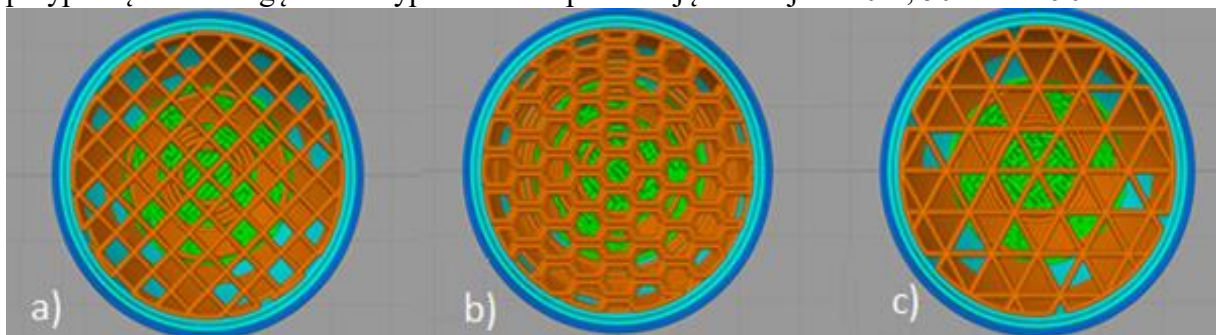
3. PRZEBIEG BADAŃ

Model kształtki do statycznej próby rozciągania tworzyw sztucznych został zaprojektowany w oparciu o normę ISO 527-2:2012. W tym celu opracowano model kształtki w postaci wioselka typu 1A (rys.). Element został zaprojektowany z wykorzystaniem oprogramowania SOLIDWORKS, zapisany w formacie stl oraz wydrukowany w technologii FDM w kolejnym etapie badań.



Rysunek 4. Model A1 kształtki do statycznej próby rozciągania tworzyw sztucznych
 Figure 4. Tensile test A1 sample model.

Do doboru geometrii wypełnienia kształtek użyto siatek dostępnych w oprogramowaniu Simplify3d tj: Grid, Honeycomb i Triangular (rys. 5) Dla każdej z tych geometrii przyporządkowano gęstości wypełnienia odpowiadające kolejno: 20%, 50% oraz 90%.



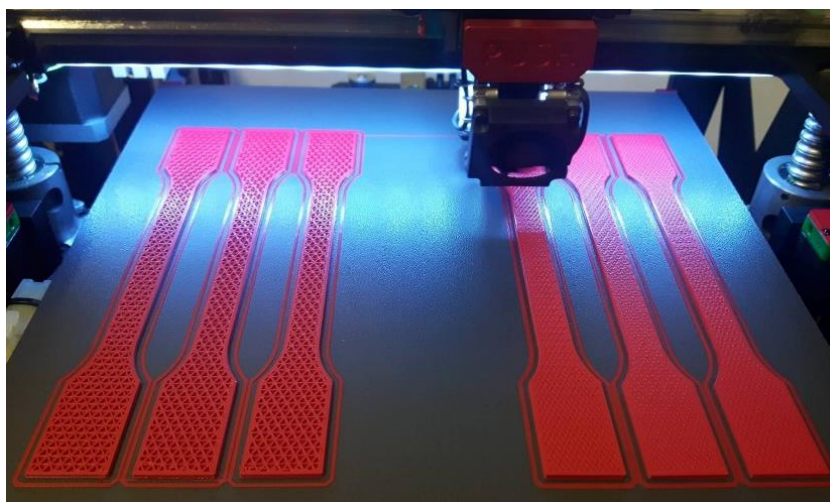
Rysunek 5. Geometrie wypełnienia: a) Grid, b) Honeycomb, c) Triangular.
 (gęstość wypełnienia 50%)

Figure 5. Infill geometries: a) Grid, b) Honeycomb, c) Triangular. (infill density 50%)

Wydruki zostały wykonane za pomocą drukarki ONE pracującej w technologii FFF firmy 3DGence (rys. 6). Wykorzystano filament z materiału PLA w kolorze czerwonym o średnicy wynoszącej 1,75mm. W tabelicy 2 zostały przedstawione najważniejsze parametry, którymi charakteryzował się proces druku.

Tablica 2. Zestawienie głównych parametrów procesu wydruku
 Table 2. The main parameters of the process

Główne parametry procesu wydruku	
Średnica zastosowanej głowicy	0,4 mm
Grubość warstwy	0,2 mm
Prędkość wydruku	40 mm/s
Początkowa temperatura stołu roboczego	75°C
Początkowa temperatura głowicy	230°C
Temperatura stołu roboczego	68°C
Temperatura głowicy	240°C



Rysunek 6. Drukowanie kształtek z materiału PLA: 50% oraz 90% Triangular
Figure 6. Manufacturing PLA samples with Triangular geometry. Density: 50% and 90%

4. WYNIKI BADAŃ WŁASNYCH

4.1 Ocena jakości otrzymanych wydruków

Próbki wydrukowane z materiału PLA poddano ocenie jakości otrzymanych wydruków. Charakteryzowały się one:

- wysoką dokładnością wymiarową,
- bardzo dobrą jakością wydruków; gładka, lekko lśniąca powierzchnia górna. Powierzchnia dolna charakteryzuje się niską chropowatością odwzorowującą strukturę stołu. Spowodowane jest to kontaktem pierwszych nakładanych warstw z powierzchnią stołu na którym serie były drukowane;
- dwie próbki (50% Grid oraz 90% Triangular) lekko podwinęły się na końcach (rys. 7). Powodem tego typu niewielkiego odkształcenia mógł być niewystarczający stopień czystości stołu. Tego rodzaju odstępstwo od idealnego kształtu próbek nie miało wpływu na mocowanie w maszynie wytrzymałościowej,
- zauważono lekko zmienione zabarwienie dla próbek 20% Triangle, 90% Grid oraz 90% Honeycomb.



Rysunek 7. Podwinięty koniec próbki 50% Grid
Figure 7. Curled end of 50% Grid sample

W celu przeprowadzenia dokładniejszej oceny elementów poddano je procesowi ważenia za pomocą wagi analitycznej. Uzyskane wyniki przedstawiono w tablicy numer 3.

Tablica 3. Wyniki pomiarów wagowych dla próbek z materiału PLA

Table 3. Weight measurements results for PLA samples.

Grid		Honeycomb		Triangular	
20%	6,05 g	20%	6,62 g	20%	6,56 g
50%	7,99 g	50%	7,91 g	50%	8,53 g
90%	11,16 g	90%	10,77 g	90%	11,23 g

Na podstawie powyższych pomiarów stwierdzono, iż wraz ze wzrostem gęstości wypełnienia wzrasta ciężar próbek. Najcięższymi próbkami okazały się próbki Triangular o gęstości wypełnienia 90%, a co za tym idzie stwierdzono, iż do ich wytworzenia wykorzystano największą ilość materiału. Najmniejszym ciężarem charakteryzowały się próbki Grid o gęstości wypełnienia 20%.

4.2 Statyczna próba rozciągania

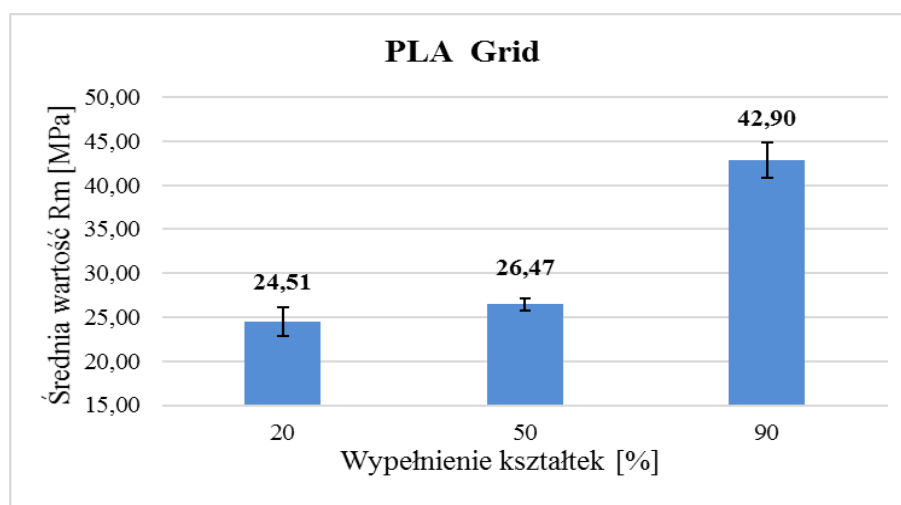
W wyniku przeprowadzenia badania statycznej próby rozciągania dla każdej z rozciąganych próbek wygenerowano wykresy wydłużenie-naprężenie (rys. 8-10) na podstawie, których odczytano wartości maksymalnego naprężenia uzyskanego dla każdej z kształtek. W oparciu o otrzymane wyniki wyznaczono średnie wartości maksymalne naprężenia dla każdego z zastosowanych rodzajów wypełnień oraz przedstawiono je za pomocą wykresów słupkowych. Ponadto wyznaczono również wartości odchylenia standardowego i błędu pomiarowego dla poszczególnych próbek o tej samej charakterystyce wypełnienia. Otrzymane wyniki otrzymane z maszyny wytrzymałościowej (R_m) oraz wyznaczone odchylenie standardowe i błąd pomiarowy zostały przedstawione w tablicy 4.

Tablica 4. Przedstawienie wyników wytrzymałości na rozciąganie, odchylenia standardowego oraz błędu pomiarowego dla każdego rodzaju kształtki

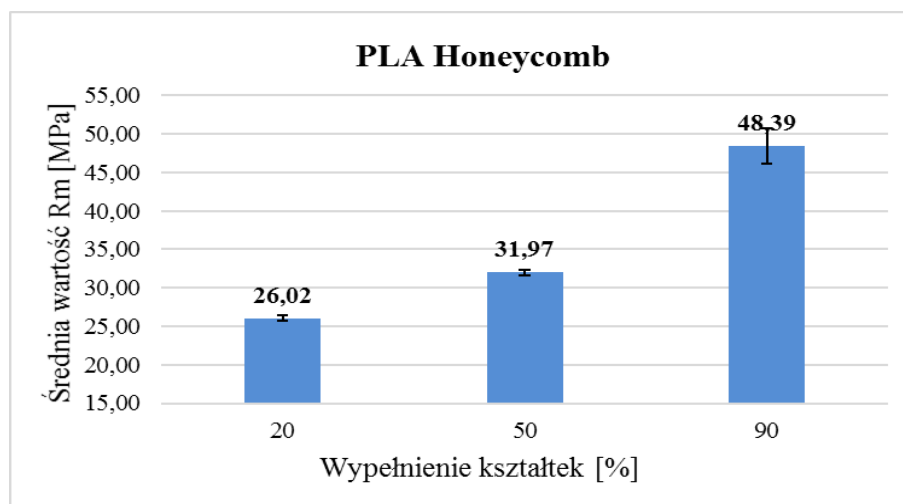
Table 4. Presentation results of tensile strength test, standard deviation and observational error for each kind of samples

	Gęstość wypełnienia	Siatka wypełnienia	Średnia wartość R_m [MPa]	Odchylenie standardowe	Błąd pomiarowy
PLA	20%	Grid	24,51	1,640	4,887
		Honeycomb	26,02	0,366	1,405

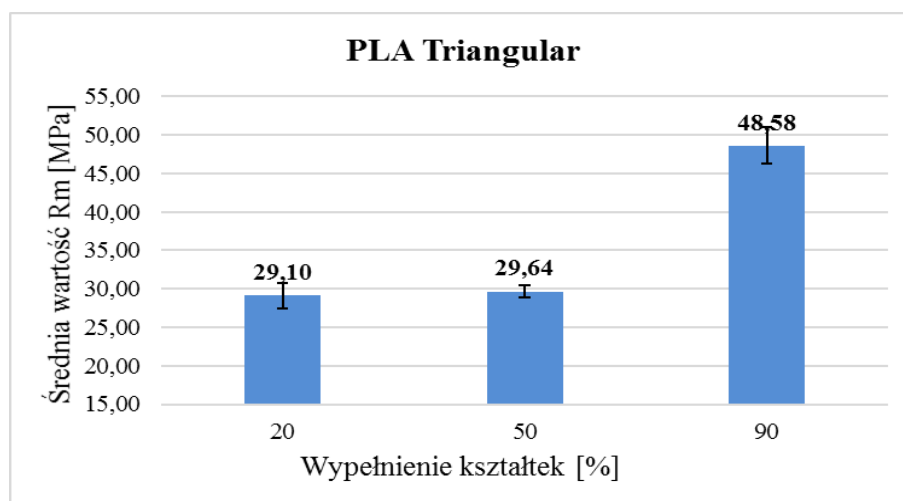
	50%	Triangular	29,10	1,672	5,744
		Grid	26,47	0,705	2,663
		Honeycomb	31,97	0,307	0,960
	90%	Triangular	29,64	0,838	2,829
		Grid	42,90	2,001	4,663
		Honeycomb	48,39	2,275	4,702
		Triangular	48,58	2,385	4,909



Rysunek 8. Średnia wytrzymałość na rozciąganie kształtek PLA w geometrii Grid
 Figure 8. The average tensile strenght of PLA samples with Grid infill

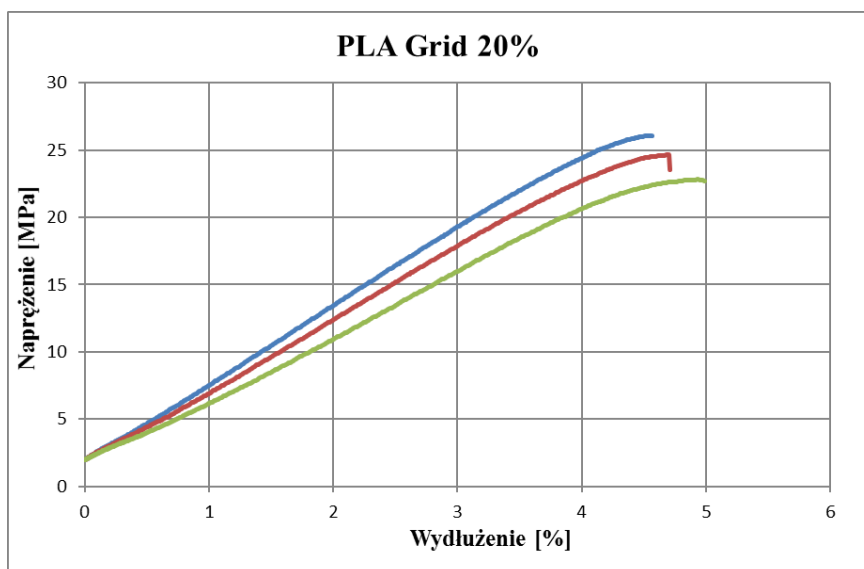


Rysunek 9. Średnia wytrzymałość na rozciąganie kształtek PLA w geometrii Honeycomb
Figure 9. The average tensile strenght of PLA samples with Honeycomb infill

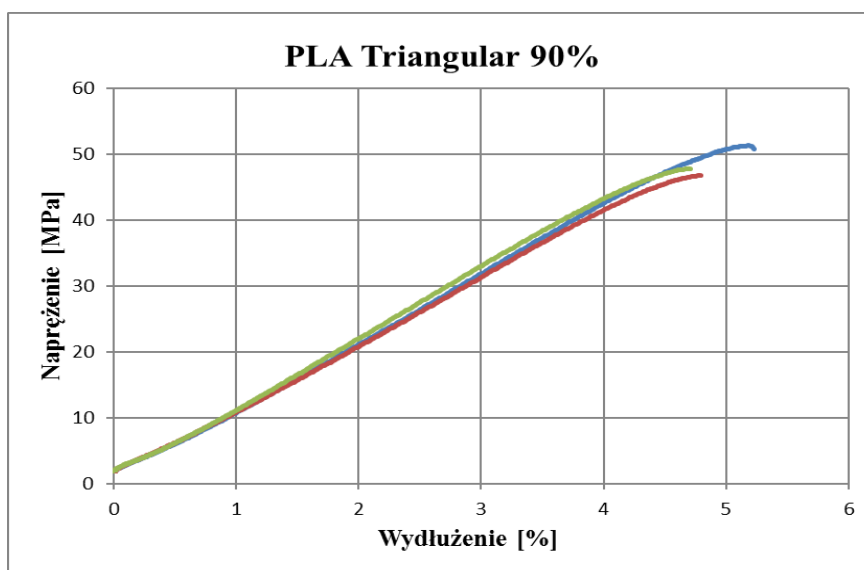


Rysunek 10. Średnia wytrzymałość na rozciąganie kształtek PLA w geometrii Triangular
Figure 10. The average tensile strenght of PLA samples with Triangular infill

W oparciu o wyniki wytrzymałościowe uzyskane na drodze badań poniżej przedstawiono wykresy wydłużenie-naprężenie dla próbek, które uzyskały zarówno największe jak i najmniejsze wartości naprężenia (rys. 11, 12). Najwyższą wartość uzyskano dla próbki o wypełnieniu Triangular 90%, która wynosiła 51,27 MPa, natomiast najmniejszą dla próbki o wypełnieniu Grid 20%, która wynosiła 26,07 MPa.



Rysunek 11. Wykres wydłużenie-napężenie dla kształtek PLA o geometrii Honeycomb 20%
Figure 11. The elongation-stress chart for PLA samples with 20% Honeycomb infill



Rysunek 12. Wykres wydłużenie-napężenie dla kształtek PLA o geometrii Triangular 90%
Figure 12. The elongation-stress chart for PLA samples with 90% Triangular infill

5. WNIOSKI

1. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, iż najlepszymi własnościami wytrzymałościowymi charakteryzują się próbki z 90% wypełnieniem o geometrii Triangular, które osiągnęły najwyższą średnią wartość naprężenia rozciągającego równego 48,58 MPa.
2. W oparciu o wykonane badania wytrzymałości na rozciąganie stwierdzono, że wraz ze wzrostem zagęszczenia próbki wartość R_m wzrasta dla wszystkich geometrii wypełnienia.

3. Jednocześnie kształtkami, które wagowo uzyskały największą gramaturę były kształtki PLA Triangular 90%. Na tej podstawie stwierdzono wpływ wartości gramatury na własności wytrzymałościowe elementów.
4. Biorąc pod uwagę aspekty ekonomiczne tj. czas trwania wydruku jednej kształtki oraz ilość zużytego materiału najbardziej korzystnymi własnościami wytrzymałościowymi charakteryzują się próbki PLA o wypełnieniu Triangular 20%, których średnia wytrzymałość na rozciąganie wynosiła 29,10 MPa. Tego typu wypełnienia warto stosować w momencie wytwarzania elementów od których oczekuje się niskiej masy i jednocześnie dobrych własności wytrzymałościowych.
5. Dzięki odpowiedniemu dostosowaniu parametrów drukarki 3D tj. grubości warstwy, temperaturze stołu roboczego oraz głowicy czy prędkości wydruku jest możliwe wytworzenie elementów o wysokiej estetyce wykończenia i dokładności oraz w czasie zdecydowanie krótszym od tradycyjnych metod wytwarzania elementów jak np. odlewanie do form.

6. LITERATURA

- [1] P. Siemiński, G. Budzik: Techniki przyrostowe. Druk 3D, drukarki 3D, Oficyna Wydawnicza.
- [2] K. Czerwiński, M. Czerwiński: Drukowanie w 3D, Wydawnictwo Infoaudit, Warszawa 2013.
- [3] <http://centrumdruku3d.pl/historia-druku-3d/> [online] 11.11.2016.
- [4] I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker: Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing, Wydawnictwo Springer.
- [5] <https://3dprint.com/47085/3d-printed-jet-engine-2/> [online] 11.11.2016.
- [6] <http://www.richardbanks.com/trends/2012/11/05/3d-printing-ceramic-bricks-for-building-construction-3dprinting/> [online] 11.11.2016.
- [7] <http://www.shapeways.com/materials/frosted-detail-plastic> [online] 11.11.2016.
- [8] <http://www.konbini.com/en/lifestyle/3d-printing-human-skin-almost-reality/> [online] 11.11.2016.
- [9] E. Chlebus: Techniki komputerowe CAx w inżynierii produkcji, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000.
- [10] A. Kaziunas France: Świat druku 3D. Przewodnik, Wydawnictwo Helion, 2014.
- [11] P. Siemiński, G. Budzik: Techniki przyrostowe. Druk 3D, drukarki 3D, Oficyna Wydawnicza.
- [12] E. Chlebus: Techniki komputerowe CAx w inżynierii produkcji, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000.
- [13] <http://3dfilamenty.com/pl/p/LAYWOOD-250g-3-mm-/316> [online] 12.11.2016.