

BADANIE WYTRZYMAŁOŚCI NA ROZCIĄGANIE PRÓBEK WYDRUKOWANYCH W TECHNOLOGII FDM Z RÓŻNĄ GĘSTOŚCIĄ WYPEŁNIENIA

Streszczenie: W niniejszym artykule przedstawiono pierwszy etap prac, który dotyczył zrywania próbek wydrukowanych metodą FDM (Fused Deposition Modeling), z różną gęstością wypełnienia, z tworzywa PLA. Celem pracy jest zbadanie wpływu parametrów technologicznych na parametry wytrzymałościowe wytwarzanego obiektu.

TENSILE STRENGTH TEST OF SAMPLES PRINTED IN FDM TECHNOLOGY WITH DIFFERENT FILLING DENSITY

Abstract: This paper presents the first stage of works which concerned breaking samples printed in FDM (Fused Deposition Modeling) technology, with different density of the filling, made of PLA. Examining the influence of technological parameters on the strength parameters of the produced object is the purpose of this work.

Słowa kluczowe: szybkie prototypowanie, druk 3D, PLA, FDM
Keywords: rapid prototyping, 3D printing, PLA, FDM

1. WPROWADZENIE

Badania przedstawione w niniejszym artykule stanowią początkowy etap prac nad wytrzymałością elementów wydrukowanych na drukarkach przestrzennych w technologii FDM (ang. Fused Deposition Modeling – Modelowanie ciepłym tworzywem) [1, 4]. W artykule przedstawiono wyniki badań nad wytrzymałością na rozciąganie próbek wydrukowanych z materiału PLA (ang. *polylactic acid, polylactide*). Aktualnie druk 3D jest bardzo popularny, wykorzystuje się go między innymi w metodach szybkiego prototypowania (RP – *rapid prototyping*) [2]. Ponadto ze względu na swoją przystępną cenę (ok. 1500 zł), proste drukarki w technologii FDM coraz częściej trafiają do zwykłych użytkowników. Projekt drukarki RepRap [3] jest ogólnodostępny i każdy może własnoręcznie złożyć swoją drukarkę 3D.

Podstawowe dane materiałowe podawane przez producentów i dystrybutorów materiałów stosowanych w metodzie FDM, tj.: wytrzymałość na rozciąganie i moduł Younga, dotyczą najkorzystniejszego ustawiania modelu podczas wydruku. Jednakże w technologiach przyrostowych i szczególnie w metodzie FDM, zbudowany obiekt jest bardzo silnie zróżnicowany warstwowo (w kierunku Z). Istotny jest również kierunek nakładania materiału (w płaszczyźnie XY). Na wytrzymałość wpływa też gęstość i rodzaj wypełniania wnętrza modelu oraz temperatura podczas drukowania. Z tych powodów konieczne jest poznanie dla konkretnych materiałów zależności pomiędzy parametrami technologicznymi a otrzymywaną

wytrzymałością. Przeprowadzone badania miały na celu określenie wytrzymałości na rozciąganie próbek wydrukowanych z różną gęstością wypełnienia.

2. TECHNOLOGIA FDM

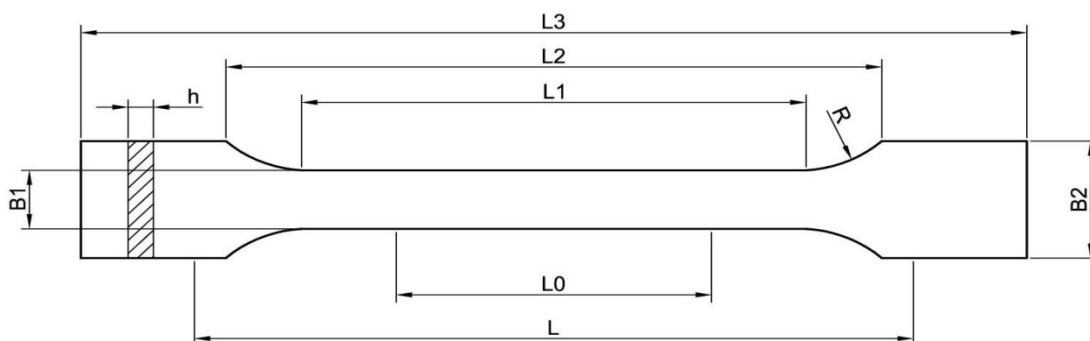
Technologia FDM [1, 4] polega na budowaniu modelu poprzez nakładanie kolejnych warstw roztopionego termoplastycznego materiału przetłaczanego przez dyszę. Dysza umieszczona jest pod termiczną głowicą z podajnikiem (ekstruderem) materiału, tzw. filamentu. Dysza z głowicą przemieszcza się w płaszczyźnie poziomej (oś X i Y). Pionowo (oś Z) przemieszcza się platforma robocza, tzw. stolik. Pozwala to na nakładanie warstw materiału zgodnie z geometrią budowanego modelu. Nakładana warstwa materiału krzepnie, łącząc się z warstwą poprzednią.

W metodzie FDM stosuje się kilka rodzajów materiałów: ABS, poliwęglan, PLA, nylon itp. Najczęściej wykorzystywanymi materiałami są ABS i PLA.

Przełomowym wydarzeniem w przypadku technologii FDM było uwolnienie części patentów należących do firmy Stratasys. Wpłynęło to na rozwój projektu RepRap, który jest najpopularniejszym i do dziś najbardziej rozwiniętym systemem FDM typu Open Source [3]. Wiedząc, że „Fused Deposition Modeling” i „FDM” są zarejestrowanymi znakami towarowymi firmy Stratasys, przy projekcie RepRap stosuje się nazwę Fused Filament Fabrication, w skrócie FFF.

3. PRÓBA ROZCIĄGANIA TWORZYW SZTUCZNYCH

Warunki i sposób przeprowadzenia próby rozciągania tworzyw sztucznych opisane są w normie PN-EN ISO 527:1998, pt. *Tworzywa sztuczne. Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu*. Próbka, nazywana w normie kształtką, jest płaska i ma kształt „wioselka” (rys. 1). Wymiary próbki należy przyjąć następujące: grubość $4,0 \pm 0,2$ mm, szerokość części pomiarowej $10 \pm 0,2$ mm i długość całkowitą powyżej 150 mm. W przypadku próbek formowanych bezpośrednio część pomiarowa ma długość 80 ± 2 mm (typ A1), a w przypadku kształtki obrabianej mechanicznie $60 \pm 0,5$ mm (typ B1). W tabeli 1 przedstawiono wszystkie wymiary wykorzystanej w badaniach próbki typu B1.



Rys. 1. Uniwersalna kształtka

Tabela 1. Wymiary kształtki

Wymiary kształtki	Typ B1
L3 – długość całkowita	150 mm
L1 – długość części ograniczonej liniami	40 mm
R – promień	60 mm
L2 – odległość między szerokimi równoległe usytuowanymi częściami	106 mm
B2 – szerokość na końcach	20 mm
B1 – szerokość wąskiej części	10 mm
H – zalecana grubość	4 mm
L0 – długość pomiarowa	50 mm
L – początkowa odległość między uchwytami	115 mm

Kształtkę zamodelowano w programie SolidWorks, w którym utworzono plik w formacie STL, niezbędnym do stworzenia kodu maszynowego. W formacie STL powierzchnia modelu przybliżana jest siatką trójkątów. W pliku zapisane są współrzędne x , y , z każdego wierzchołka trójkąta oraz wektor normalny do powierzchni każdego z trójkątów. Taki zapis powoduje niedokładności odwzorowania modelu, utworzone trójkąty nie oddają idealnie rzeczywistej powierzchni. Przy czym im więcej trójkątów, tym większa dokładność, ale także większy rozmiar pliku. Na podstawie pliku STL w programie Cura 14.12.1 [5] utworzono kod maszynowy, tzw. Gcode.

Próbki zostały wydrukowane z tworzywa PLA firmy Noviplast (o kolorze czerwonym) na drukarce BIG Builder DUAL FEED holenderskiej firmy Builder 3D Printers HQ. Drukarka posiada dyszę o średnicy 0,4 mm, co pozwala drukować warstwy o wysokości od 0,05 do 0,3 mm. Wszystkie kształtki zostały wydrukowane na płasko, wzdłuż osi Y drukarki. Aby zachować powtarzalność próbek, kształtki drukowano pojedynczo, zachowując następujące parametry drukowania:

- prędkość drukowania pierwszej warstwy: 20 mm/s,
- prędkość drukowania: 60 mm/s,
- temperatura głowicy: 215°C,
- wysokość warstwy: 0,2 mm,
- grubość dolnej i górnej warstwy: 0,6 mm,
- grubość ścian bocznych: 0,8 mm.

Dodatkowo wykorzystano podgrzewany stolik, na którym ustawiono temperaturę $60\pm 5^\circ\text{C}$.



Rys. 2. Przekrój próbki wypełnionej krzyżowo pod kątem 45° o gęstości wypełnienia:

a) 10%, b) 20%

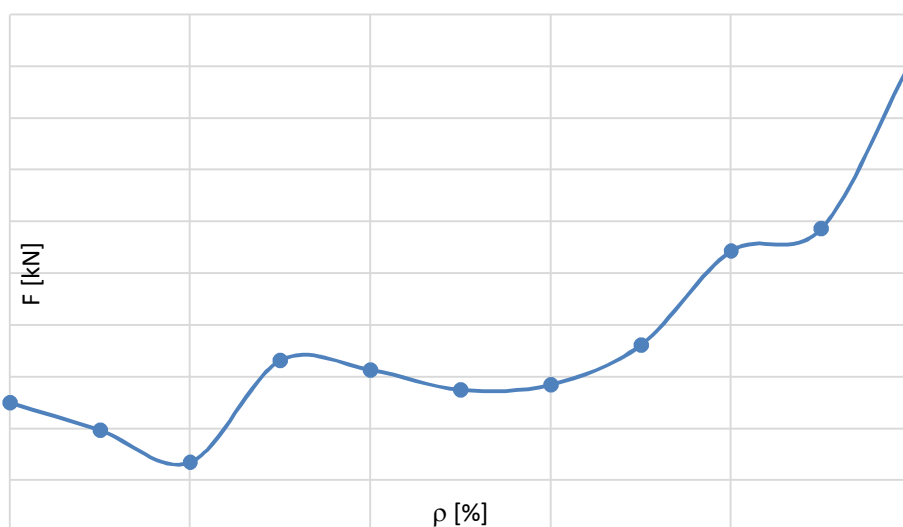
Podczas drukowania próbek wykorzystano wypełnienie krzyżowe pod kątem 45° (rys. 2) względem osi Y. Gęstość wypełnienia kształtek zmieniano od 0 do 100% co 10%. Próbkę z wypełnieniem 0%, aby było możliwe jej otrzymanie, wydrukowano z wypełnieniem 10% i o kącie wypełnienia równym 90° w stosunku do osi wzdłużnej kształtki. Taki sposób wypełnienia nie wpływa na parametry próbki przy rozciąganiu i można ją traktować jako niewypełnioną w środku. Z każdym rodzajem wypełnienia wydrukowano po trzy próbki.

4. WYNIKI

Otrzymane wyniki z prób rozciągania w zależności od gęstości wypełnienia zestawiono w tabeli 2. Wyniki otrzymane w trzech próbach były powtarzalne, świadczy to o poprawnie wykonanej próbie. Dodatkowo wykreślono wykres średniej siły zrywającej w funkcji gęstości wypełnienia próbki (rys. 3).

Tabela 2. Zestawienie wartości sił rozrywających

Gęstość wypełnienia [%]	Próba 1: siła rozrywająca [kN]	Próba 2: siła rozrywająca [kN]	Próba 3: siła rozrywająca [kN]	Średnia wartość siły rozrywającej [kN]
0	0,92	0,9	0,88	0,90
10	0,84	0,78	0,76	0,79
20	0,68	0,65	0,68	0,67
30	1,1	1,05	1,04	1,06
40	1	0,98	1,1	1,03
50	0,94	0,97	0,94	0,95
60	1,03	1,05	0,83	0,97
70	1,08	1,03	1,26	1,12
80	1,57	1,42	1,47	1,49
90	1,66	1,62	1,44	1,57
100	2,34	2,15	2,18	2,22

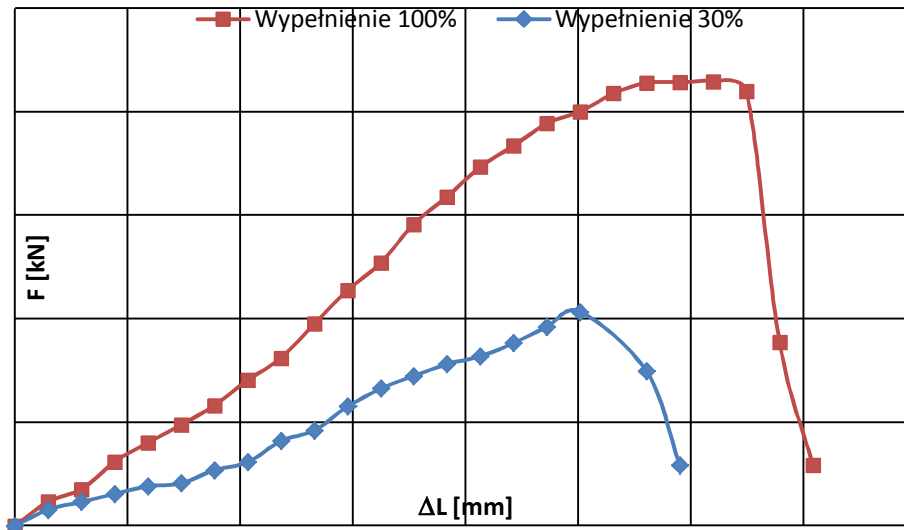


Rys. 3. Wykres średniej siły zrywającej w funkcji gęstości wypełnienia próbek

Wykonano również wykresy siły rozciągającej w funkcji wydłużenia. Na rysunku 4 przedstawiono przebieg siły dla próby rozciągania kształtki o gęstości wypełnienia 100%,

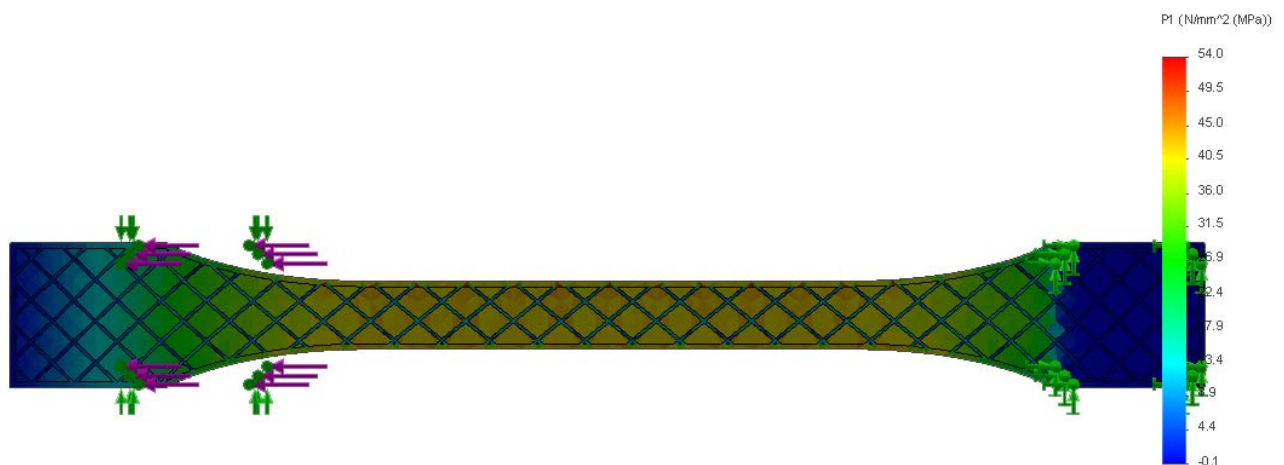
czyli z pełnym wypełnieniem (tzw. solid), oraz dla najczęściej stosowanego wypełnienia 30%. Z przedstawionych poniżej wykresów wynika, że rozciągane próbki wykazują właściwości kruche.

W przypadku próbki z pełnym wypełnieniem granice plastyczności można wyznaczyć na poziomie $R_e = 46$ MPa, z kolei wytrzymałość na rozciąganie $R_m = 53$ MPa.

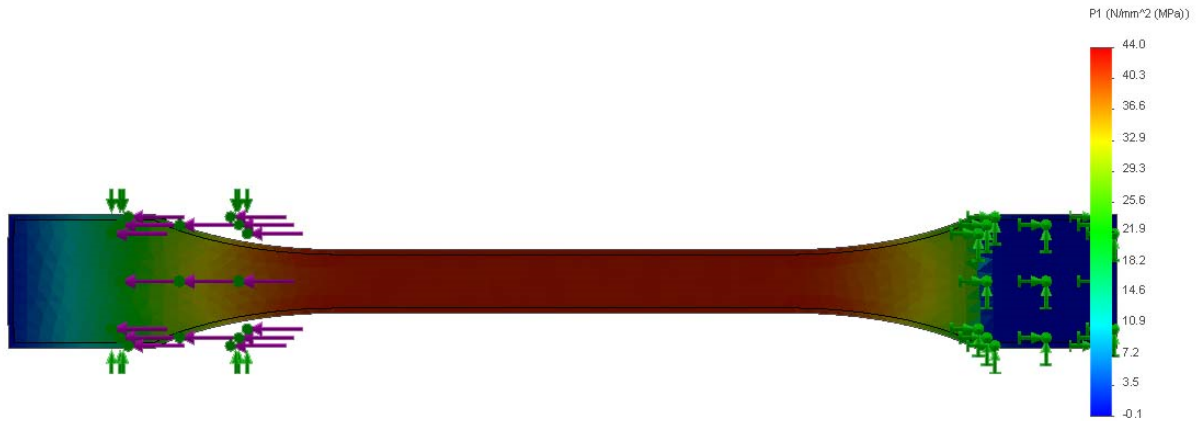


Rys. 4. Wykres rozciągania kształtki

Na rysunkach 5 i 6 zamieszczono wykresy naprężeń rozciąganej próbki uzyskane metodą elementów skończonych w programie SolidWorks. Kształtki rozciągano siłą wzdłużną o wartości 700 N. Na wykresach można zauważyć, że w przypadku wypełnienia 20% występują koncentracje naprężeń.



Rys. 5. Wykres naprężeń głównych rozciąganej kształtki o wypełnieniu 20% (przekrój)



Rys. 6. Wykres naprężeń głównych rozciąganej kształtki o wypełnieniu 0% (przekrój)

5. WNIOSKI

Element powstały w technologii FDM jest mniej wytrzymały niż przedmiot wykonany na wtryskarce, ale można w pewnym stopniu sterować wytrzymałością poprzez gęstość i sposób wypełnienia. Mniejsza gęstość wypełnienia powoduje mniejsze zużycie materiału modelowego, co znacząco przekłada się na koszty wydruku. Dodatkowo znacząco skraca się czas wytworzenia. Przedmiot jest mniej wytrzymały, ale jest w dalszym ciągu funkcjonalny.

Z przeprowadzonych badań wynika, że dopiero powyżej 70% gęstości wypełnienia próbki rośnie znacząco wytrzymałość na rozciąganie. W zakresie od 30 do 70% wytrzymałość jest porównywalna. Wynika z tego, że ze względów ekonomicznych optymalną gęstość wypełnienia można przyjąć na poziomie 30%. Należy również nadmienić, że w technologii FDM/FFF domyślną gęstość wypełnienia przyjmuje się na poziomie 20-30%.

Spadek wartości siły zrywającej dla próbki o wypełnieniu 20%, w stosunku do wypełnienia 10% i 0%, został również zaobserwowany w obliczeniach numerycznych metodą elementów skończonych w programie SolidWorks. Krzyżowe wypełnienie próbki w kształcie kratownicy powoduje koncentrację naprężeń. Gęstsze wypełnienie próbki wpływa na gładzy rozkład naprężeń oraz wzrost rzeczywistego pola przekroju próbki, co skutkuje spadkiem naprężeń głównych.

LITERATURA

- [1] Choi J., Medina F., Kim Ch., Espalin D., Rodriguez D., Stucker B., Wicker R.: *Development of a mobile fused deposition modeling system with enhanced manufacturing flexibility*, "Journal of Materials Processing Technology", 211, 2011, s. 424-432.
- [2] Gebhardt A.: *Rapid Prototyping*, Carl Hanser Verlag, Munich, 2003.
- [3] <http://reprap.org/>
- [4] <http://www.stratosys.com/>
- [5] <http://ultimaker.com/>