

Porównanie wytrzymałości na rozciąganie próbek kompozytowych wydrukowanych w technologii FDM z próbkami wydrukowanymi z PLA

Tensile strength comparison of composite specimens printed in FDM technology with specimens printed from PLA

WOJCIECH KIŃSKI
PAWEŁ PIETKIEWICZ
KRZYSZTOF NALEPA
WOJCIECH MIĄSKOWSKI*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.7.90>

Prezentowano wyniki badań wytrzymałościowych zrywania próbek wydrukowanych w technologii FDM (*fused deposition modeling*) z różną gęstością wypełnienia, z materiałów PLA i PET. Celem pracy jest zbadanie wpływu parametrów technologicznych na parametry wytrzymałościowe wytwarzanego obiektu oraz porównanie próbek wydrukowanych z dwóch materiałów z próbkami wydrukowanymi z jednego materiału. **SŁOWA KLUCZOWE:** drukarka 3D, badanie wytrzymałościowe, FDM, łączenie materiałów

*Presented is the breaking strength test of specimens printed in FDM (*fused deposition modeling*) technology with different filling density, of PLA and PET materials: combined with each other. The aim of the study is to investigate the influence of technological parameters on the strength parameters of the produced object and to compare specimens printed of two materials simultaneously with those made of a single material.*

KEYWORDS: 3D printer, strength test, FDM, combining materials

Elementy z tworzyw sztucznych są zazwyczaj wytwarzane przez wtryskiwanie tworzywa do formy. Coraz częściej produkcje małoseryjne lub prototypowe opierają się głównie na wytwarzaniu elementów z wykorzystaniem drukarek 3D. Najbardziej rozpowszechnioną technologią jest FDM (*fused deposition modeling*), która polega na budowaniu modelu przez nanoszenie roztopionego tworzywa sztucznego warstwa po warstwie, spajając ze sobą wcześniej naniesione warstwy. Tworzywo sztuczne – najczęściej w formie drutu nawiniętego na szpulę – pobierane jest do głowicy, gdzie jest rozgrzewane do temperatury topnienia i wytłaczane przez dyszę [1, 2].

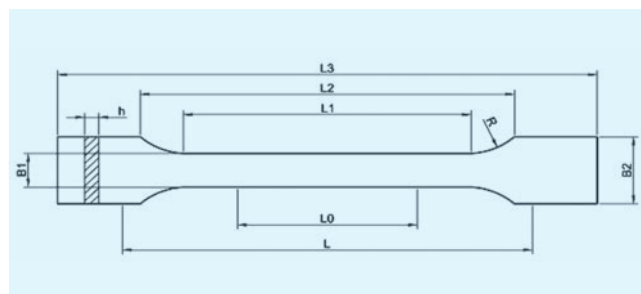
Drukarki 3D pozwalają na wytwarzanie modeli z różnych materiałów: tworzyw sztucznych oraz kompozytów. Przy doborze surowca użytkownik kieruje się parametrami materiału. Jednak w technologiach przyrostowych (również FDM) ważny jest kierunek nakładania materiału, który determinuje właściwości wytrzymałościowe wydruku w różnych płaszczyznach. Na wytrzymałość modeli wpływają także takie parametry, jak: rodzaj i stopień wypełnienia modelu, temperatura oraz prędkość wydruku.

* Mgr inż. Wojciech Kiński (wojciech.kinski@uwm.edu.pl), dr inż. Paweł Pietkiewicz (papiet@uwm.edu.pl), dr inż. Krzysztof Nalepa (nalepka@uwm.edu.pl), dr inż. Wojciech Miąskowski (wojmek@uwm.edu.pl) – Wydział Nauk Technicznych Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego

Porównawcze badania wytrzymałości na rozciąganie

Badania wytrzymałościowe zostały wykonane w laboratorium wytrzymałości materiałów w Katedrze Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie. Metody przeprowadzania prób rozciągania tworzyw sztucznych opisane są w normie PN-EN ISO 527:1998 – Tworzywa sztuczne. Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu. Model 3D próbki został zamodelowany w programie SolidWorks. Do odczytu przez drukarkę wymagany jest zapis w formacie STL. Model STL zbudowany jest z trójkątów, przez co odwzorowanie łuków i elementów krzywoliniowych jest w pewien sposób uproszczone.

Na rys. 1. przedstawiono próbkę wraz z oznaczeniem jej wymiarów charakterystycznych, które zestawiono w tabl. I.



Rys. 1. Próbkę do badań wytrzymałościowych

TABLICA I. Wymiary próbek

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

Do badań wytrzymałościowych użyto próbek wykonanych z:

- materiału PLA,
- materiału PET,
- połączenia materiałów PLA i PET, przy czym rdzeń próbki wykonano z materiału PLA, a ścianę modelu – z materiału PET,
- połączenia materiałów PLA i PET, przy czym rdzeń próbki wykonano z materiału PET, a ścianę modelu – z materiału PLA.

Łączenie dwóch materiałów było możliwe dzięki zastosowaniu innowacyjnej, profesjonalnej drukarki 3D, wyposażonej w dwie głowice drukujące. W tabl. II zamieszczono wartości parametrów druku próbek.

TABLICA II. Parametry druku

Nazwa	Wartość
Wysokość warstwy, mm	0,2
Prędkość wydruku, mm/s	70
Grubość ścianek modelu, mm	0,8
Nawiew powietrza schładzającego wydruk, %	100
Temperatura stołu, °C	65
Temperatura głowicy PLA, °C	200
Temperatura głowicy PET, °C	235
Średnica dyszy głowic, mm	0,4

W tabl. III przedstawiono wyniki prób wytrzymałościowych próbek wykonanych z jednego materiału.

TABLICA III. Wyniki prób wytrzymałościowych próbek z jednego materiału

	Średnia wartość siły rozrywającej, kN	
	PLA	PET
Tylko skorupa (model pusty w środku)	0,45	0,14
Samo wypełnienie bez skorupy	2,06	1,12
Obrys z wypełnieniem	2,15	1,36

Badania, których wyniki zapisano w tabl. III, wykonano dla trzech wariantów wykonania próbek. Próbki o najmniejszej wytrzymałości na rozciąganie składały się tylko ze ścianki zewnętrznej i nie miały wypełnienia. Wyższe wartości siły rozrywającej otrzymano dla próbek bez warstwy zewnętrznej. Najwyższe wartości siły rozrywającej odnotowano w przypadku próbek składających się z warstwy zewnętrznej oraz wypełnienia. Siła rozrywająca próbkę pełną wykonaną z materiału PET jest zbliżona do sumy sił rozrywających sam rdzeń oraz warstwę zewnętrzną bez wypełnienia. Większą różnicę od tej reguły odnotowano w badaniu próbek z materiału PLA.

W tabl. IV przedstawiono wyniki badań wytrzymałościowych na rozciąganie próbek wykonanych z połączenia materiałów PLA i PET, przy czym ścianka zewnętrzna wykonana była z materiału PLA, a wypełnienie – z materiału PET. Gęstość próbek była zwiększana od 0 do 100% z krokiem co 10%. Wypełnienie próbek miało formę siatki pod kątem 45°.

Wyniki wykazały tendencję do wzrostu wartości siły rozrywającej próbkę wraz z rosnącym stopniem wypełnienia pola przekroju materiału, przy czym zarówno w przypadku wypełnienia 20%, jak i 60÷70% próbki wykazywały niższą wytrzymałość na rozciąganie niż próbki z wypełnieniem odpowiednio: 10 i 30% oraz 50 i 80%.

TABLICA IV. Zestawienie średnich sił rozrywających próbki ze ścianką z PLA i rdzeniem z PET

Siła, kN	Stopień wypełnienia, %									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
	0,54	0,46	0,56	0,63	0,78	0,72	0,76	0,88	0,90	0,94

O ile tendencja do wzrostu siły rozrywającej wraz ze stopniem wypełnienia rdzenia próbki materiałem była zgodna z oczekiwaniami, to wartość siły rozrywającej w przypadku próbki wypełnionej materiałem w 100% nie odpowiadała wartościom przedstawionym w tabl. III dla próbek wykonanych z jednego materiału. Wartość siły rozrywającej próbkę z połączonych materiałów była znacząco niższa zarówno od wartości odpowiadającej próbce składającej się z samego rdzenia PET, jak i pełnej próbce z PET.

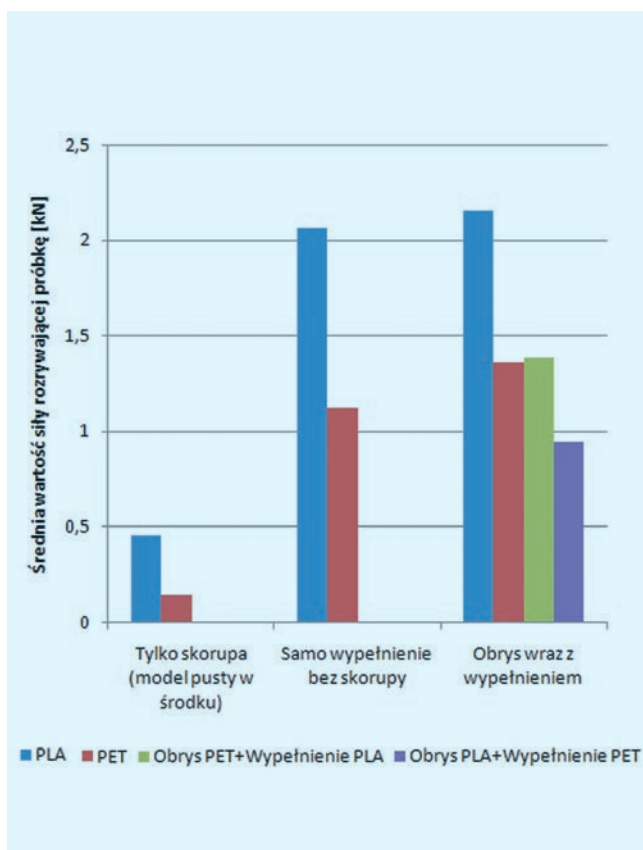
Wykonano dodatkowe porównanie wartości sił rozrywających próbki we wszystkich wariantach przy założeniu, że rdzenie są wypełnione w 100% materiałem. Wyniki porównania zamieszczono w tabl. V.

TABLICA V. Porównanie wartości sił rozrywających próbki z rdzeniem 100%

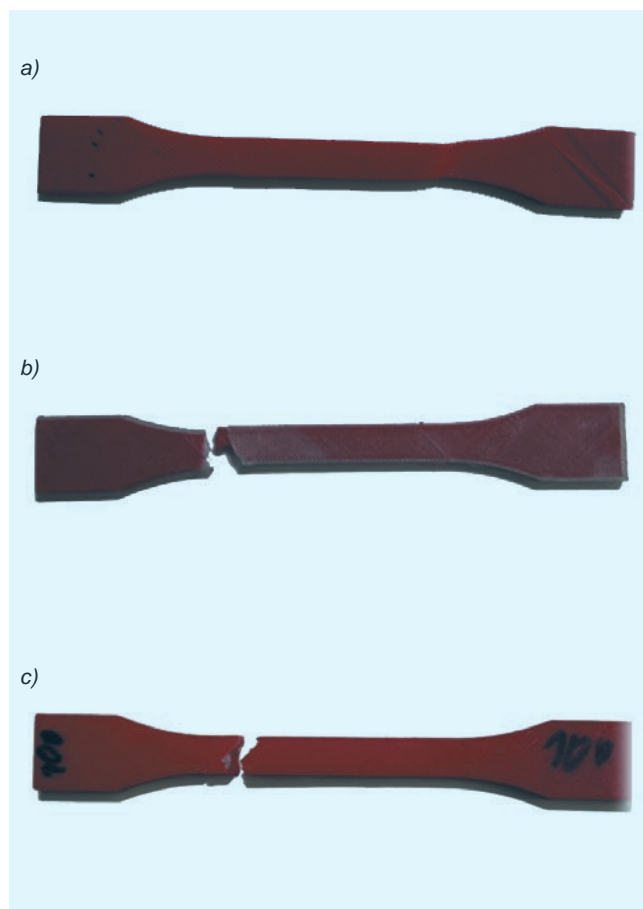
Materiał ściany	Materiał rdzenia	Wartość siły rozrywającej, kN
PLA	PLA	2,15
PET	PET	1,36
PET	PLA	1,38
PLA	PET	0,94

Na rys. 2. przedstawiono interpretację wyników z tabl. III i V. Z porównania wyników wynika, że zastosowanie połączenia materiałów znacząco obniża wartość siły rozrywającej próbkę podczas rozciągania. W przypadku próbek wykonanych z materiału PLA, zastosowanie ściany zewnętrznej z materiału PET osłabia wytrzymałość na rozciąganie o blisko 36%, natomiast w przypadku próbek wykonanych z materiału PET zastosowanie ściany zewnętrznej z materiału PLA obniża wartość siły rozrywającej próbkę podczas rozciągania o prawie 31%.

Zaobserwowane obniżenie wytrzymałości próbek na rozciąganie przy zastosowaniu połączenia materiałów zmusiło zespół badawczy do analizy możliwych przyczyn takiego zjawiska. Wydaje się, że kluczowym aspektem jest przebieg odkształcania się próbek przed ich rozerwaniem podczas rozciągania. Na rys. 3a przedstawiono fotografię próbki wykonanej z materiału PLA wykonaną po przerwaniu badania na rozciąganie. Z jej prawej strony widoczne jest charakterystyczne przewężenie, którego uformowanie się poprzedza zerwanie próbki. Na rys. 3b przedstawiono analogiczną fotografię próbki wykonanej z połączenia materiałów, przy czym rdzeń próbki wykonano z PLA, a ściankę z PET. Próbka nie uległa odkształceniu polegającemu na wystąpieniu przewężenia. Widoczne



Rys. 2. Porównanie średniej siły rozrywającej dla każdego wariantu próbek



Rys. 3. Próbkę: a) z PLA z charakterystycznym przewężeniem; b) kompozytowa – ścianka z PET, rdzeń z PLA; c) kompozytowa – ścianka z PLA, rdzeń z PET

jest rozerwanie struktury bez widocznej zmiany wymiaru poprzecznego próbki. Podobne zjawisko wystąpiło w przypadku próbki wykonanej z obu materiałów, z rdzeniem z PET i ścianką z PLA (rys. 3c).

Zjawisko braku charakterystycznego przewężenia próbki podczas rozciągania prowadzi do wniosku, że próbki z kompozytu różnią się znacząco od próbek wykonanych z jednego materiału.

Podsumowanie

Badania wytrzymałościowe pozwoliły na porównanie wartości sił rozrywających poddane rozciąganiu próbki wykonane metodą druku 3D w technologii FDM z różną konfiguracją wypełnienia materiałem. Analiza wyników pozwala na sformułowanie kilku wniosków:

- Mimo silnie anizotropowej struktury materiału, dzięki rozbudowanemu oprogramowaniu oraz innowacyjnym urządzeniom można w znacznym stopniu wpłynąć na parametry wytrzymałościowe produktów otrzymywanych z wykorzystaniem druku 3D, m.in. poprzez zmianę struktury wypełnienia materiałem przekrojów wykonywanych wydruków.

- Mimo anizotropowej struktury modeli otrzymywanych metodą druku 3D z pojedynczego materiału, podczas prób rozciągania obserwuje się występowanie charakterystycznych dla materiałów izotropowych odkształceń próbek w postaci przewężenia.

- Łączenie materiałów w drukowanych próbkach zmienia ich właściwości na tyle znacznie, że podczas prób rozciągania nie obserwuje się wystąpienia przewężeń, takich jak w próbkach wykonanych z jednego materiału.

- Łączenie materiałów bardzo poważnie obniża wartości sił rozrywających materiały kompozytowe w porównaniu z wartościami sił rozrywających materiały, z których te kompozyty się składają. Stosowanie kompozytów w technologii druku 3D nie gwarantuje więc podwyższenia parametrów wytrzymałościowych wydruków wykonanych w technologii FDM.

Wyniki prób wytrzymałościowych wskazują na potrzebę kontynuacji tego rodzaju badań również w kontekście zmiany parametrów wydruku poszczególnych materiałów wchodzących w skład kompozytu.

* * *

Prace zostały zrealizowane w ramach projektu „Modele funkcjonalne i badania konstrukcji quasi-autonomicznego punktu oświetleniowego lub sygnalizacyjnego” (decyzja Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr 5119/B/T02/2011/40 z 4 lutego 2011 r.).

LITERATURA

1. <http://reprap.org/> (dostęp: 21.02.2017 r.).
2. 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.
3. <http://www.centrumdruku3d.pl/> (dostęp: 21.02.2017 r.).
4. Miazio Ł. „Badanie wytrzymałości na rozciąganie próbek wydrukowanych w technologii FDM z różną gęstością wypełnienia”. *Mechanik*. 7 (2015): s. 533–538. ■