

# Badanie parametrów mechanicznych struktur drukowanych o różnym zagęszczeniu

## Study of mechanical parameters of different densities printed structures

JERZY MADEJ  
MATEUSZ ŚLIWKA\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.11.184>  
English version available on: [www.mechanik.media.pl](http://www.mechanik.media.pl)

Na podstawie badań wytrzymałościowych próbek o porowatej strukturze, wydrukowanych w technologii FDM (*fused deposition modeling*) z filamentów PC/ABS, przeprowadzono symulację numeryczną belek sprężyste zginanych dla 2 różnych gęstości wypełnienia. Wyniki analiz numerycznych zostały zweryfikowane doświadczalnie i porównane z wynikami, jakie uzyskuje się w przypadku przyjęcia handlowych parametrów wytrzymałościowych surowca użytego do druku. Przeprowadzone i planowane badania pozwolą na opracowanie metodyki obliczania konstrukcji o strukturze porowatej, wytworzonych w technologii druku 3D.

**SŁOWA KLUCZOWE:** druk 3D, badania wytrzymałościowe, modelowanie numeryczne

*Based on the strength tests of porous structure samples printed in FDM technology (fused deposition modeling) from PC/ABS filaments, numerical simulations of bending spring beams for two different filling densities, have been performed. The results of numerical analyzes have been verified experimentally and compared with those obtained with the commercial strength parameters of the raw material used for printing. Conducted and planned studies will allow to develop a methodology for calculating the porous structure created in 3D printing technology.*

**KEYWORDS:** 3D printing, strength tests numerical methods

Stosowane do niedawna tradycyjne technologie wytwarzania elementów z tworzyw sztucznych i metali zostały uzupełnione o technologię druku 3D, która sprawdza się zwłaszcza w przypadku wytwarzania produktów nieseryjnych lub prototypowych. Możliwości współczesnych drukarek 3D w zakresie tworzenia dowolnych struktur i kształtów z zastosowaniem różnych materiałów wyjściowych są imponujące i rozwojowe, a produkty uzyskane tą drogą są przedmiotem wielu badań i analiz [1–4].

Jedną z najpowszechniej stosowanych technologii drukowania obiektów z tworzyw sztucznych jest metoda FDM

(*fused deposition modeling*), polegająca na nanoszeniu przez głowicę drukarki kolejnych warstw roztopionego drutu, wykonanego z tworzywa o znanych właściwościach handlowych. W ten sposób otrzymuje się element o żądanym kształcie i wymaganej strukturze wewnętrznej.

Technologia druku 3D pozwala na wytwarzanie elementów o porowatej strukturze, co ogranicza ilość zużywanego materiału wyjściowego, jednak właściwości mechaniczne finalnego produktu odbiegają od właściwości takich samych produktów o strukturze jednolitej.

W przypadku wykonywania symulacji pracy konstrukcji o strukturze porowatej w różnych stanach obciążenia zasadne jest przyjmowanie do obliczeń stałych materiałowych różniących się od tych, jakie ma materiał, z którego wydrukowano konstrukcję.

### Przedmiot badań

W niniejszym artykule omówiono:

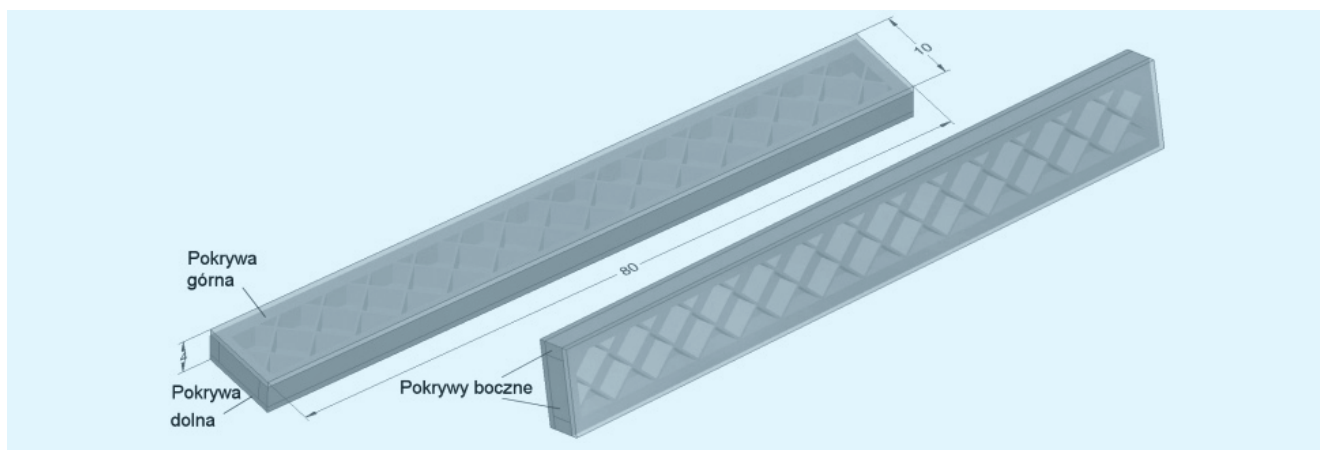
- model obliczeniowy belek drukowanych, które poddano sprężystemu zginaniu;
- weryfikację doświadczalną wyników otrzymanych na drodze symulacji numerycznej;
- porównanie wyników symulacji z wynikami obliczeń, w których przyjęto stałe materiałowe filamentu użytego do druku.

Przedmiotem badań są belki drukowane o 2 różnych zagęszczeniach – LOW (niskim) i MED (średnim), wykonane z filamentów PC/ABS o module Younga 2250 MPa i liczbie Poissona równej 0,4. Model geometryczny próbki pokazano na rys. 1, a widok struktury wewnętrznej belek – na rys. 2.

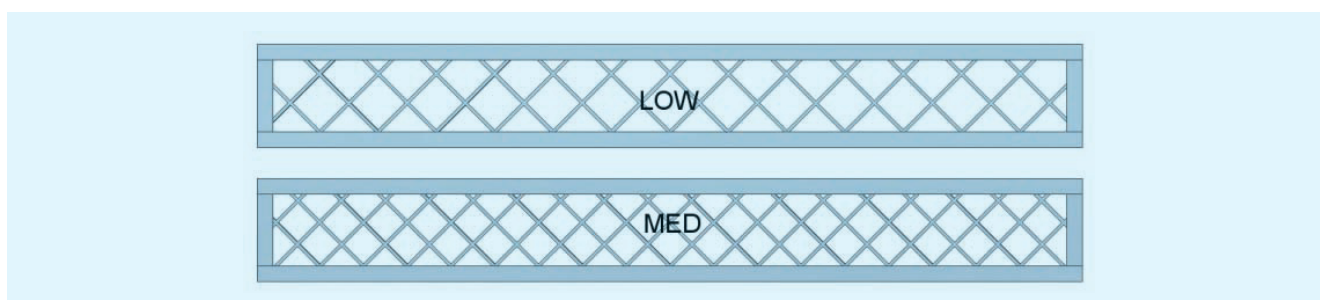
Grubość ścianek kratownicy wewnętrznej wynosi 0,3 mm, grubość pokrywy górnej i dolnej – 0,7 mm, a pokryw bocznych – 1,5 mm.

W wyniku przeprowadzonych prób statycznego rozciągania próbek wioselkowych dla każdego zagęszczenia wyznaczono zastępczy moduł Younga  $E_z$ . W przypadku zagęszczenia LOW wyniósł on 1933 MPa, a w przypadku zagęszczenia MED – 1897 MPa. Otrzymane wartości są zatem niższe od modułu sprężystości filamentu.

\* Dr hab. inż. Jerzy Madej ([juma@ath.bielsko.pl](mailto:juma@ath.bielsko.pl)), inż. Mateusz Śliwka ([sliwkamateuszjan@gmail.com](mailto:sliwkamateuszjan@gmail.com)) – Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej



Rys. 1. Model geometryczny próbek

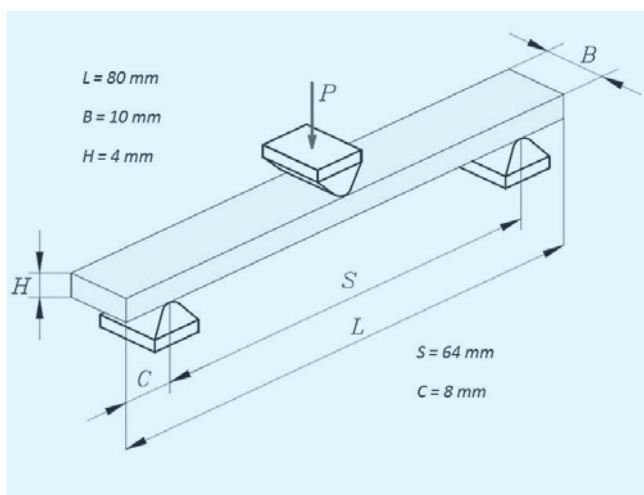


Rys. 2. Widok struktury wewnętrznej próbek

### Pomiary ugięcia belek zginanych

Zginanie 3-punktowe przeprowadzono zgodnie z normą [5], z prędkością 2 mm/min. Stosunek grubości próbki do rozstawu podpór był równy 1:16 (rozstaw podpór wynosił 64 mm).

Schemat stanowiska do zginania 3-punktowego przedstawiono na rys. 3.

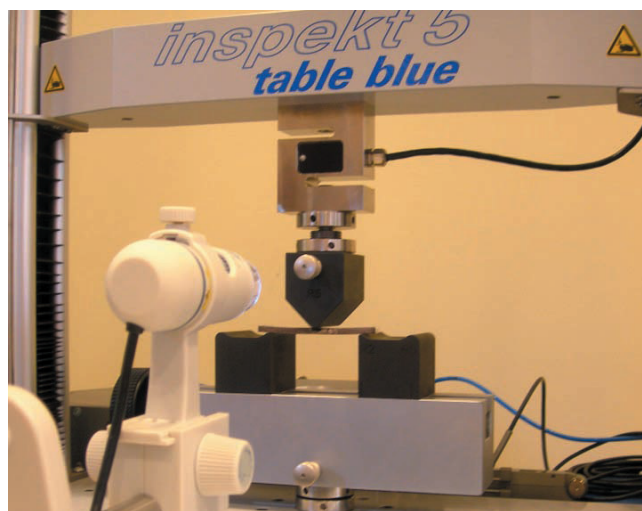


Rys. 3. Schemat stanowiska 3-punktowego zginania

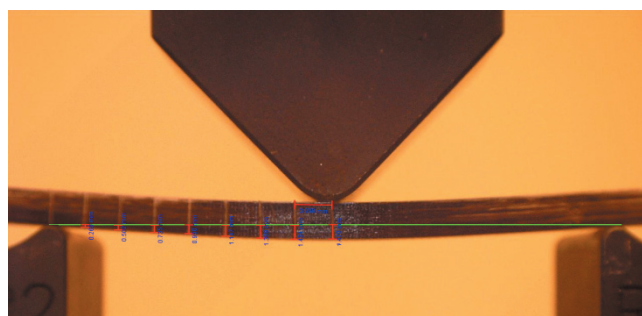
Na potrzeby rejestrowania wartości ugięcia ściankę próbki o wymiarach 80 × 4 mm zacementowano – na tak przygotowaną powierzchnię naniesiono markery (zaczynając od punktu środkowego próbki) co 4 mm.

Badanie dla każdego zagęszczenia wykonano w serii 5 próbek na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej Inspekt 5 Table Blue firmy Hegewald und Peschke (rys. 4). Ugięcia próbki w miejscach markerów zarejestrowano

za pomocą kamery Delta Optical BioLight 300, a następnie w programie Delta Optical Smart Analysis Pro wyznaczono wartości tych ugięć (rys. 5). Średni pomiar ugięcia w miejscach markerów przedstawiono w tabl. I.



Rys. 4. Badanie próbek na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej Inspekt 5 Table Blue



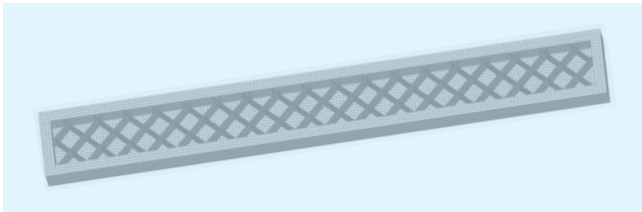
Rys. 5. Zdjęcie ugiętej próbki z pomiarami ugięcia markerów

TABLICA I. Średnie ugięcia wybranych punktów belki

Pozycja markera, mm	Średnie ugięcie dla próbek LOW	Średnie ugięcie dla próbek MED
32	0	0
28	0,269	0,257
24	0,504	0,503
20	0,736	0,734
16	0,950	0,954
12	1,152	1,156
8	1,321	1,317
4	1,443	1,428
0	1,480	1,464

### Analiza numeryczna

Model dyskretny, służący do przeprowadzenia obliczeń metodą elementów skończonych, przygotowano w programie FEMAP 11.2. Kratownicę wewnętrzną modelowano za pomocą elementów typu PLATE, a pokrywy – za pomocą elementów typu SOLID. Na rys. 6 przedstawiono model dyskretny belki z zagęszczeniem MED (nie pokazano widoku pokrywy górnej, aby uwidocznić strukturę wewnętrzną belki). W tabl. II zestawiono natomiast liczby i rodzaje elementów struktury dyskretny.



Rys. 6. Model dyskretny belki z zagęszczeniem MED

TABLICA II. Liczba i rodzaj elementów

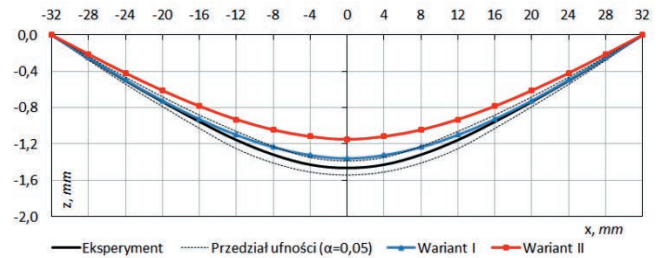
Rodzaj zagęszczenia	Liczba węzłów	Liczba elementów	
		3D	2D
LOW	183 711	118 560	10 900
MED	194 629	118 560	14 480

Wprowadzono podpory w rozstawie 64 mm. W środku rozpiętości belki przyłożono siłę 20 N, wywołującą zginanie belki w zakresie sprężystym. W miejscu przyłożenia siły zastosowano dodatkową podporę blokującą przesuw wzdłuż osi belki.

Przygotowano 2 modele obliczeniowe – dla zagęszczenia LOW i MED. Obliczenia dla każdego modelu przeprowadzono w 2 wariantach. W wariantach pierwszym modelom dyskretnym przypisano zastępczy moduł Younga, wyznaczony w próbie rozciągania, a w wariantach drugim przyjęto moduł sprężystości filamentu.

W wyniku przeprowadzonych obliczeń otrzymano przedmieszczenia węzłów odpowiadających punktom pomiarowym w eksperymencie, dzięki czemu model numeryczny można było poddać walidacji.

Na rys. 7 przedstawiono linię ugięcia uzyskaną z obliczeń dla belki o zagęszczeniu MED. Linią niebieską oznaczono ugięcia uzyskane dla zastępczego modułu sprężystości, linią czerwoną – wyniki otrzymane dla modułu sprężystości filamentu, a linią czarną – wyniki eksperymentu. Identyfikacyjny charakter miały również wykresy dla belki o zagęszczeniu LOW. Jak widać, ugięcia obliczone z zastosowaniem modułu sprężystości filamentu mieszczą się poza przedziałem ufności  $\alpha = 0,05$ .



Rys. 7. Linia ugięcia dla belek o zagęszczeniu MED (w wariantach I przyjęto zastępczy moduł sprężystości, a w wariantach II – moduł sprężystości filamentu)

W tabl. III przedstawiono wartości strzałki ugięcia obliczone dla każdego z wariantów i porównano je z wartościami wyznaczonymi eksperymentalnie.

TABLICA III. Porównanie strzałki ugięcia belek

Rodzaj próbki	Eksperyment	Obliczenia			
		Wariant I (dla $E_z$ )		Wariant II (dla $E$ filamentu)	
		ugięcie, mm	błąd, %	ugięcie, mm	błąd, %
LOW	1,480	1,347	8,99	1,155	21,96
MED	1,464	1,360	7,10	1,149	21,52

### Podsumowanie

Materiały wytworzone metodą druku przestrzennego zmieniają swoje własności mechaniczne w stosunku do materiału, z którego wytworzono filament. Statyczna próba rozciągania wykazała, że próbki o wypełnieniu niskim LOW mają większy zastępczy moduł sprężystości podłużnej w porównaniu z próbkami o zagęszczeniu średnim MED.

Porównując wyniki analizy numerycznej sprężystego zginania z wynikami badań doświadczalnych, można zauważyć, że przyjęcie w obliczeniach zastępczego modułu Younga, wyznaczonego dla próbki o określonej strukturze wewnętrznej, daje wyniki zbliżone do pomiarów. W przypadku struktury o zagęszczeniu LOW względny błąd procentowy nie przekracza 9%, a w przypadku zagęszczenia MED wynosi 7%. W obu przypadkach obliczone ugięcia są nieco mniejsze od zmierzonych. W przypadku przyjęcia do obliczeń modułu Younga filamentu otrzymuje się natomiast wyniki z błędem przekraczającym 21%, a ugięcia są znacząco mniejsze.

Reasumując, można stwierdzić, że na potrzeby modeli obliczeniowych konstrukcji o strukturze drukowanej, z różnym stopniem zagęszczenia materiału, do obliczeń należy przyjmować wyznaczone doświadczalnie charakterystyki materiałowe wydrukowanej struktury, nie zaś charakterystyki materiałowe filamentu.

### LITERATURA

- Miazio Ł. „Badanie wytrzymałości na rozciąganie próbek wydrukowanych technologią FDM z różną gęstością wypełnienia”. *Mechanik. 7* (2015): s. 533–538.
- Miazio Ł. „Badanie wytrzymałości na zginanie próbek wydrukowanych technologią FDM z różną gęstością wypełnienia”. *Mechanik. 7* (2016): s. 758–759.
- Miazio Ł. „Badanie wytrzymałości na rozciąganie próbek wydrukowanych w technologii FDM z różną gęstością wypełnienia – wypełnienie heksagonalne i koncentryczne”. *XXI Międzynarodowa Szkoła Komputerowego Wspomagania Projektowania, Wytwarzania i Eksploatacji, Jurata* (2017): s. 55–60.
- Kiński W., Pietkiewicz P., Nalepa K., Miąskowski W. „Porównanie wytrzymałości na rozciąganie próbek kompozytowych wydrukowanych w technologii FDM z próbkami wydrukowanymi z PLA”. *XXI Międzynarodowa Szkoła Komputerowego Wspomagania Projektowania, Wytwarzania i Eksploatacji, Jurata* (2017): s. 297–303.
- DIN EN ISO 178 Plastics determination of flexural properties (2003). ■