

Analiza numeryczna własności mechanicznych wypełnienia wydruku 3D oraz tworzenie modelu uproszczonego

Krzysztof Bobrowski, Wiktoria Wojnicz, Krzysztof Lipiński

Wydział Mechaniczny, Katedra Mechaniki i Mechatroniki, Politechnika Gdańska
email: krzbobro@student.pg.gda.pl; wiktoria.wojnicz@pg.gda.pl; klipinsk@pg.gda.pl

STRESZCZENIE: W pracy zaprezentowano wyniki badań numerycznych szacujących zastępcze własności detali powstałych przy użyciu drukarek przestrzennych (wydruk 3D). Analizę ograniczono do technologii FDM (ang. Fused Deposition Modeling – osadzanie topionego materiału). Analizowana struktura ma postać przestrzennego wypełnienia liniowego (włókna tworzące kratkową strukturę). Badany element wykonano z poliaktydu. W badaniu skoncentrowano się na korelacji struktury wypełnienia wydruku (opisanego w skali mikro) na całościową zmianę własności mechanicznych (skala makro). Badano reakcję wydruku na jednoosiowe ściskanie (skala makro). Obliczenia wykonano przy założeniu występowania odkształceń liniowo-sprężystych. Do budowy modelu numerycznego wykorzystano metodę elementów skończonych. W pracy omówiono 3 metody wyznaczania zastępczych własności mechanicznych dla struktur wypełnienia wydruku oraz zaprezentowano sposób budowy uproszczonego modelu obliczeniowego. Dodatkowym pod zagadnieniem jest badanie korelacji pomiędzy wartością modułu Younga a gęstością wypełnienia wydruków 3D.

SŁOWA KLUCZOWE: rapid-prototyping, 3D printing, FDM, Young moduł, FEM

1. Wstęp

Drukowanie 3D to technologia używana do bezpośredniej konwersji modelu 3D powstałego przy użyciu technik projektowych CAD (z ang. computer aided design) do fizycznego modelu prototypu. Ze względu na wykorzystywanie różnych materiałów budulcowych oraz technologii nanoszenia wyróżniamy kilka metod drukowania przestrzennego: metoda stereolitografii (SLA), metoda osadzania topionego (FDM), selektywne spiekanie laserowe proszków (SLS) czy przyrostowe nanoszenie stopionego fotonopolimeru akrylowego (MJM). Najbardziej powszechną oraz najtańszą formą wydruku zarówno pod względem kosztu zakupu drukarki jak i eksploatacji jest metoda FDM (Fused Deposition Modeling) [5].

Podstawowe dane mechaniczne wydruków 3D, takie jak granica plastyczności, wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na rozciąganie podawane są zarówno przez producentów materiałów użytkowych jak i przez producentów drukarek. Najczęściej prezentują one własności mechaniczne badanych materiałów tylko w jednym z możliwych kierunków orientacji materiału, najczęściej w tym, o najwyższym wskaźniku wytrzymałości [7]. Co więcej, wydruk 3D powstały metodą przyrostową jest materiałem ortotropowym, cechującym się silnym zróżnicowaniem własności mechanicznych w zależności od orientacji wydruku oraz parametrów wydruków [2, 3]. W konsekwencji parametry wydruku takie jak konfiguracja wydruku w przestrzeni, temperatura, prędkość wydruku oraz gęstość wypełnienia znacznie wpływają na własności materiałowe, a co za tym idzie na wytrzymałość całego wydruku.

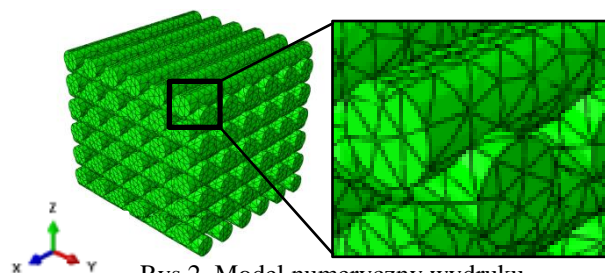
W pracy podjęto próbę wyznaczenia własności mechanicznych takich jak moduł Younga i współczynnik Poissona dla struktur wypełnienia wydruków 3D za pomocą symulacji komputerowych MES przy odwzorowaniu jednoosiowej próby ściskania oraz zaproponowano uproszczony model obliczeniowy wypełnienia, w którym struktura składająca się z pojedynczych włókien została zastąpiona bryłą o takich samych wymiarach zewnętrznych.

2. Model geometryczny

Badany przez autorów model geometryczny wypełnienia wydruku 3D składa się on z 12 warstw włókien ułożonych krzyżowo. Każde włókno o średnicy $D=0,7\text{mm}$ odpowiada pojedynczej ścieżce wytłaczanej przez dyszę drukarki. Przyjęta wysokość warstwy wynosi $0,5\text{mm}$. Całkowite wymiary badanego detalu wynoszą w kierunkach poprzecznych $6,35\text{mm}$ i $6,35\text{mm}$ oraz wysokość $5,86\text{mm}$.

3. Model numeryczny

Model numeryczny wypełnienia został stworzony w programie ABAQUS 6.14-AP. Do przeprowadzenia próby jednoosiowego ściskania wykorzystano liniowo-sprężysty model materiałowy, który zakłada liniową relację pomiędzy przyłożonym obciążeniem a odpowiedzią układu. Poszczególne włókna przejść wydruku opisane są jako materiał izotropowy o module Younga $1517,85\text{MPa}$ [1] i współczynniku Poissona $0,33$ [2]. Model obliczeniowy stworzono przy użyciu elementów skończonych typu C3D10 (element typu solid, tetragonalny, 10-cio węzłowy).



Rys.2. Model numeryczny wydruku

Do wyznaczenia modułu Younga dla wypełnienia wydruku przyjęto dwa typy warunków brzegowych.

Warunki brzegowe typu A zastosowano poprzez zdefiniowanie obciążenia w postaci przemieszczenia wzdłuż osi pionowej prostopadłej do płaszczyzny wydruku o wielkości $U=0,002\text{mm}$. Miejscem założenia przemieszczenia są powierzchnie w górnej warstwie struktury wydruku. U podstawy modelu założono warunki

brzegowe podpory stałej (przesunięcia $U_x=0$, $U_y=0$, $U_z=0$). Dodatkowo, w miejscu aplikacji obciążenia założono warunki brzegowe podpory nieprzesuwnej w płaszczyźnie prostopadłej do wektora obciążenia.

Warunki brzegowe typu B odwzorowujące ściskanie wypełnienia wydruku odpowiadają modelowi, w którym do badanej kostki przyłożone jest obciążenie w postaci siły $P=25N$. Siła jest przeliczona odpowiednio na ciśnienie jednostkowe przyłożone do górnej powierzchni wypełnienia. Warunki brzegowe podpór zostały założone analogicznie do typu A.

4. Wyniki

W wyniku próby przeprowadzonych badań zaproponowano 3 metody wyznaczenia modułu Younga.

Metoda 1 - w wyniku próby ściskania z wykorzystaniem warunków brzegowych typu A otrzymano rozkład naprężeń normalnych w badanej strukturze. Z wykorzystaniem zależności (1) wyliczona wartość modułu Younga wynosi 659,84 MPa.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (1)$$

Metoda 2 - w wyniku próby ściskania z wykorzystaniem warunków brzegowych typu B otrzymano mapę rozkładu naprężeń i przemieszczeń występujących w strukturze. Referencyjną wielkością liczbową obserwowaną podczas próby ściskania była wartość maksymalnych przemieszczeń występujących w badanej strukturze. Wykorzystując zależność (2) do wyznaczenia naprężeń normalnych (gdzie siła P zdefiniowana jest jako warunek brzegowy obciążenia, S - poprzeczne pole przekroju badanego modelu geometrycznego) oraz zależność wynikającą ze wzoru (1) wyliczona wartość modułu Younga wynosi 618,52 MPa.

$$\sigma = \frac{P}{S} \quad (2)$$

Metoda 3 opiera się na wynikach próby ściskania przeprowadzoną w zastosowaniu warunków brzegowych typu B. Referencyjną wielkością liczbową obserwowaną podczas próby ściskania była wartość maksymalnych przemieszczeń oraz naprężeń normalnych występujących w strukturze. Wykorzystując zależność (1) wartość modułu Younga wynosi 635,38 MPa.

Badania powtórzone dla 3 najważniejszych kierunków wydruku. Moduły Younga E_x oraz E_y są to wartości otrzymanymi w płaszczyźnie wydruku, natomiast E_z w kierunku prostopadłym do płaszczyzny wydruku.

Tabela 1. Wyniki kierunkowych modułów Younga

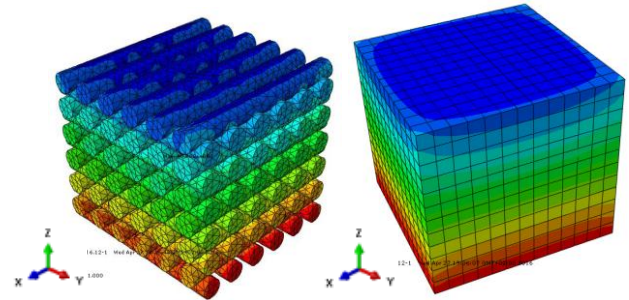
Metoda	E_x [MPa]	E_y [MPa]	E_z [MPa]
1	2535,04	2456,51	659,84
2	643,18	661,84	618,52
3	292,43	293,45	635,38

Współczynniki Poissona wyznaczono na podstawie stosunku odkształcenia poprzecznego (oś X i Y) do podłużnego (oś Z). Wartości odkształceń uzyskano na podstawie symulacji.

Tabela 2. Kierunkowe wsp. Poisson'a

Kierunek	ν [-]
ZX	0,268
ZY	0,269

Zaproponowany przez autorów model zastępczy dla struktury wydruku 3D zmniejsza liczbę użytych elementów do analizy oraz skrótca czasu obliczeń. Struktura składająca się z pojedynczych włókien została zastąpiona bryłą o takich samych wymiarach zewnętrznych. Z wykorzystaniem własności materiałowych wydruku otrzymanych w wyniku przeprowadzonych symulacji wyznaczono zastępcze parametry materiałowe były opisującej geometrię wydruku. Po aplikacji stałych materiałowych uzyskanych w badaniu do oprogramowania Abaqus uzyskujemy prostopadłościan o własnościach materiałowych zbliżonych do struktury wypełnienia wydruku 3D.



Rys.4. Porównawczy rozkład mapy przemieszczeń [mm] dla modelu nieuproszczonego (z lewej) oraz dla modelu uproszczonego (z prawej)

5. Podsumowanie

W przeprowadzonych badaniach wynika że:

- 1) Każda z zaproponowanych metod dostarcza przybliżone wartości modułu Younga wyznaczonego w kierunku prostopadłym do płaszczyzny wydruku.
- 2) Metoda 2 wyznaczania modułu Younga jest metodą o najmniejszym zróżnicowaniu wyników wynikających ze zmiany wielkości przyjętej do badań geometrii-zmiana liczby włókien i warstw wydruków.
- 3) Z przeprowadzonych badań wynika, że wyniki wartości przemieszczeń uzyskane w modelu uproszczonym są bardzo porównywalne do modelu nieuproszczonego. Błąd względny dla przemieszczeń prostopadłych do płaszczyzny wynosi poniżej 0,1%.

Literatura

- [1] Naghieh, S. et al., 2016. Numerical investigation of the mechanical properties of the additive manufactured bone scaffolds fabricated by FDM: The effect of layer penetration and post-heating.. *Elsevier*, pp. 241-250.
 - [2] C.Casavola, A.Cazzato, V.Moramarco & C.Pappalettere, 2016. Orthotropic mechanical properties of fused deposition modelling parts described by classical laminate theory. *Elsevier*, Issue 90, pp. Vol.90, pp.453-458.
 - [3] Torrado, A. R. et al., 2015. Characterizing the effect of additives to ABS on the mechanical propertyanisotropy of specimens fabricated by material extrusion 3D printing. *Elsevier*, pp. vol.6, pp.16-29.
 - [4] Domingo-Espin, M. et al., 2015. Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts. *Elsevier*, pp. pp. 670-677.
 - [5] Ksawery Szykiedans, W. Credo, 2016. Mechanical properties of FDM and SLA low-cost 3-D prints. *Elsevier*, pp. vol.136, pp.257-262.
 - [6] Martíneza, J. et al., 2013. Comparative between FEM models for FDM parts and their approach to a real mechanical behaviour.. *Elsevier*, pp. vol.63, pp.878-884.
- Mazio, D. i. Ł., 2015. Badania wytrzymałości na rozciąganie próbek wydrukowanych w technologii FDM z różną gęstością wypełnienia.. *Mechanik*.