

# XVII Konferencja Naukowo-Techniczna

# TKI2024

## TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

15–18 października 2024

### Badania energochłonności (odpowiedzi mechanicznej) przestrzennych struktur komórkowych wytworzonych przrostowo w warunkach testu ściskania

Mateusz Banaszek<sup>1</sup>, Paweł Baranowski<sup>1</sup>, Paweł Płatek<sup>2</sup>, Kamil Cieplak<sup>2</sup>, Marcin Sarzyński<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Wydział Inżynierii Mechanicznej, Wojskowa Akademia Techniczna

<sup>2</sup>Wydział Mechatroniki Uzbrojenia i Lotnictwa, Wojskowa Akademia Techniczna

email: mateusz.banaszek@student.wat.edu.pl, pawel.baranowski@wat.edu.pl, pawel.platek@wat.edu.pl, kamil.cieplak@wat.edu.pl, marcin.sarzyński@wat.edu.pl

**STRESZCZENIE:** W niniejszej pracy zostały zaprezentowane wyniki badań eksperymentalnych oraz numerycznych dotyczących odpowiedzi mechanicznej przestrzennych struktur komórkowych w warunkach testu ściskania. W tym celu wytworzono zarówno próbki wiósełkowe do badań materiałowych, jak i struktury komórkowe typu lattice przy użyciu techniki addytywnej Fused Filament Fabrication (FFF) z materiału PET-G. Do realizacji zadania wykorzystano drukarkę 3D Prusa i3 MK3S. Wytworzone struktury poddano testom jednoosiowego ściskania w warunkach quasi-statycznych w celu analizy procesu ich deformacji oraz zdolności do pochłaniania energii. Ponadto przeprowadzono korelację modelu materiałowego w środowisku numerycznym CAE bazując na wynikach z quasi-statycznego jednoosiowego rozciągania próbek wiósełkowych. W tym celu wykorzystano oprogramowanie LS-Dyna, które pozwoliło odwzorować przebieg statycznej próby rozciągania dla materiału, z którego wykonane zostały struktury. Przedstawione wyniki wykazały, że opracowane topologie wytworzone z zastosowaniem materiału PET-G deformują się w sposób kontrolowany, bez widocznej obecności mechanizmu zniszczenia w postaci kruchego pęknięcia. Dowodem na to jest długi zakres uzyskanego tzw. plateau w przebiegu krzywych siła-przemieszczenie. Świadczy to o dużej zdolności do absorpcji energii mechanicznej struktur typu lattice wytworzonych przrostowo.

**SŁOWA KLUCZOWE:** Fused Filament Fabrication, PETG, Additive Manufacturing, struktury komórkowe, truss-based lattice

#### 1. Wprowadzenie

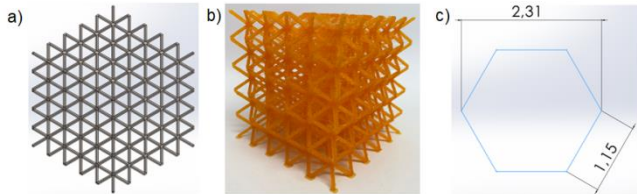
Struktury komórkowe stanowią przedmiot wielu prac badawczych ze względu na wysoką zdolność do pochłaniania energii mechanicznej. Zarówno struktury 2D oraz struktury 3D posiadają skomplikowany kształt, którego wykonanie nie jest łatwe przy użyciu tradycyjnych metod wytwórczych [1]. Z uwagi na niniejsze ograniczenie, struktury komórkowe o skomplikowanej topologii w większości przypadków wytwarzane są przy użyciu technik addytywnych. Należy przy tym zwrócić uwagę na metodę druku 3D oraz sam materiał budulcowy, który może generować ewentualne problemy związane z procesem wytwórczym, np. konieczność stosowania podpór czy późniejsza obróbka post-processingowa. Mając na uwadze powyższe, metoda FFF (Fused Filament Fabrication) stanowi ciekawą alternatywę umożliwiającą wytwarzanie struktur komórkowych typu 3D [2]. Dzięki niej istnieje możliwość wytwarzania skomplikowanych struktur komórkowych np. typu truss-based 3D lattice. Jest to jedna z najpopularniejszych i szeroko stosowanych technik druku 3D [3]. Dzięki tej metodzie można wytworzyć obiekty

relatywnie niskim kosztem, w krótkim czasie oraz uzyskując jednocześnie zadowalającą jakość odwzorowania geometrii wyjściowej. Ponadto technika ta pozwala na wykorzystanie szerokiej gamy dostępnych materiałów, od polimerów po filamenty kompozytowe zbrojone proszkami metalicznymi. Jednym z powszechnie stosowanych materiałów polimerowych jest PET-G (Polyethylene Terephthalate Glycol-modified), który cechuje się względnie wysoką wytrzymałością mechaniczną oraz dużą udurowieniem. W przypadku wspomnianego materiału nie jest wymagana obróbka poprodukcyjna co stanowi niewątpliwie jego istotną zaletę.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie wyników badań eksperymentalnych oraz numerycznych przestrzennych struktur komórkowych typu truss-based lattice wytworzonych przy użyciu technologii FFF z polimeru PET-G w warunkach quasi-statycznego testu ściskania. Dodatkowo, przeprowadzono identyfikację właściwości mechanicznych zastosowanego filamentu na potrzeby dalszych badań numerycznych.

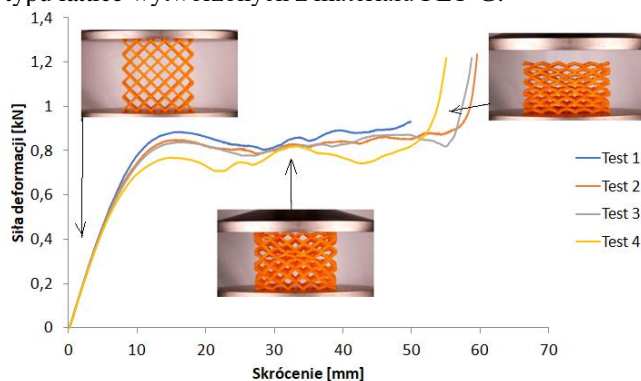
## 2. Wytwarzanie struktur komórkowych z PET-G

Na Rys.1 przedstawiono przykładową, opracowaną strukturę komórkową typu based-centered cubic (BCC) o sześciokątnym przekroju pojedynczej belki i średnicy 1,15 mm. Gęstość relatywna dla opracowanej struktury wyniosła 6%. Wymiary gabarytowe próbki, o kształcie sześcianu wyniosły 84,85x84,85x84,85 mm. Wielkość komórki elementarnej wyniosła 16,97 mm.



Rys.1 Widok: a) modelu 3D struktury truss-based lattice, b) próbki wytworzonej techniką FFF z PET-G, c) przekroju pojedynczej belki

Podczas wytwarzania próbek zauważono, że filament, który nie był poddany procesowi suszenia skutkowało obecnością defektów wytwarzanego obiektu w postaci struktury włoskowatej. W związku z tym zdecydowano, aby obniżyć wilgotność filamentu poprzez umieszczenie go w komorze rękawicowej w atmosferze Argonu 5.2. Tak przygotowane próbki zostały poddane testom jednoosiowego ściskania w warunkach quasi-statycznych z prędkością 1 mm/s. Należy zauważyć, że próbka była ustawiona dokładnie w taki sam sposób jak była wytwarzana. Testy mechaniczne zostały wykonane przy użyciu maszyny wytrzymałościowej MTS Criterion C45.105. Cały proces ściskania próbek został zarejestrowany przy użyciu aparatu cyfrowego, co pozwoliło na dokładną analizę procesu deformacji struktur. Wykonano łącznie 4 testy: 3 z filamentu poddanego osuszeniu (filament pomarańczowy, próbki nr 1-3) oraz 1 test z filamentu o wyższej wilgotności (filament transparentny, próbka nr 4). Na Rysunku 2 zostały przedstawione przebiegi siły deformacji w funkcji skrócenia testowanej próbki (Rys. 2). Uzyskano stabilny przebieg siły z widocznym plateau, co świadczy o dużej zdolności do absorpcji energii mechanicznej przez struktury typu lattice wytworzonych z materiału PET-G.



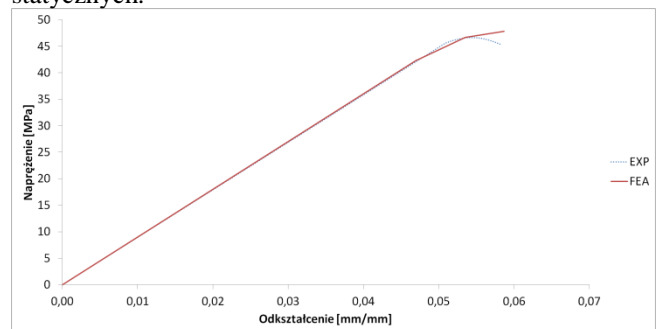
Rys.2 Wykresy siła-skrócenie badanych struktur typu lattice

## 3. Badania materiałowe oraz korelacja modelu konstytutywnego PET-G

Równoległe do wykonanych testów quasi-statycznego ściskania struktur przeprowadzono testy wytrzymałościowe w celu oceny właściwości mechanicznych materiału PET-G. Na ich podstawie przeprowadzono korelację modelu konstytutywnego, aby w kroku kolejnym poprawnie

odzworować numerycznie proces deformacji testowanych struktur [4]. W tym celu wykorzystano oprogramowanie CAE - LS-Dyna oraz opracowano dyskretny model próbki stosując hexagonalną siatkę elementów skończonych o wielkości 0,75 mm (4 elementy na grubości próbki)

Na Rys. 3 zostało przedstawione porównanie krzywych rozciągania otrzymanych z testów wytrzymałościowych oraz z symulacji numerycznej MES. Dla rzeczywistych testów przedstawiono uśrednioną krzywą uzyskaną z pięciu próbek wiasełkowych. Otrzymano idealną zgodność przebiegu krzywych zarówno w zakresie sprężystym, jaki i plastycznym, co świadczy o prawidłowym skorelowaniu modelu materiałowego. Powyższe badania są punktem wyjściowym do przeprowadzania symulacji numerycznych MES procesu jednoosiowego ściskania opracowanych struktur komórkowych typu lattice w warunkach quasi-statycznych.



Rys.3 Porównanie wyników badań eksperymentalnych i numerycznych

## 4. Wnioski i dalsze kroki badań

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że:

- 1) Struktury komórkowe typu lattice charakteryzują się wysoką energochłonnością i mogą one znaleźć zastosowanie w panelach ochronnych pojazdów wojskowych czy o przeznaczeniu specjalnym.
- 2) Dostępność addytywnych technik wytwarzania pozwala na opracowanie nowych, bardziej skomplikowanych struktur typu lattice.
- 3) Niniejszą pracą można rozwinąć o przeprowadzenie badań ze zmienionym przekrojem belki oraz zmienioną gęstością relatywną. Takie podejście da odpowiedź na pytanie czy zmiana tych parametrów istotnie poprawi właściwości energochłonne struktur.
- 4) Przeprowadzone badania są punktem wyjściowym do realizacji badań struktur komórkowych wytworzonych z filamentów metalicznych.

## Literatura

- [1] Hanfeng Y., Wenzheng Z., Liangcong Z., Fanbo M., Jie L., Guilin W., *Review on lattice structures for energy absorption properties*, Composite Structures, Volume 304, 2023.
- [2] Singh, S., Singh, G., Prakash, C., & Ramakrishna, S., *Current status and future directions of fused filament fabrication*, Journal of Manufacturing Processes, 55(January), 288–306, 2020.
- [3] Kumaresan R., Mahendran S., Kumaran K., Wan S. Wan H., Mustafizur R., *Fused deposition modeling: process, materials, parameters, properties, and applications*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 120, 1531-1570, 2022.
- [4] Baranowski P., Małachowski J., Platek P., Szafrńska A., *LENS Ti-6Al-4V alloy material properties determination for LS-Dyna package*, AIP Conference Proceedings 2078, 2019.