

XVII Konferencja Naukowo-Techniczna

TKI2024

TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

15–18 października 2024

Badanie energochłonności nowatorskich topologii struktur komórkowych – studium numeryczne oraz badania eksperymentalne

Mateusz Majdak^{1*}, Paweł Baranowski¹, Paweł Płatek², Jerzy Małachowski¹

¹Institut Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Wojskowa Akademia Techniczna

²Institut Techniki Uzbrojenia, Wydział Mechatroniki, Uzbrojenia i Lotnictwa, Wojskowa Akademia Techniczna

email: mateusz.majdak@wat.edu.pl

STRESZCZENIE: Celem niniejszej pracy było porównanie wybranych struktur komórkowych w aspekcie ich właściwości energochłonnych w quasi-statycznej próbie jednoosiowego ściskania. W wyniku wstępnej preselekcji wytypowano dwie topologie bazowe: inspirowaną pędem bambusa (ang. Bio-inspired Bamboo Stem) (BBS) oraz Re-entrant honeycomb (RE), a następnie na ich podstawie opracowano szereg nowatorskich topologii. Struktury zostały wytworzone w technologii Fused Deposition Modeling (FDM) z filamentu PET-G. W ramach pracy przeprowadzono testy eksperymentalne, wyznaczono parametry modelu konstytutywnego oraz przeprowadzono studium numeryczne.

SŁOWA KLUCZOWE: wytwarzanie przyrostowe, struktury komórkowe, badania energochłonności struktur komórkowych

1. Wstęp

Struktury komórkowe ze względu na swoje wyjątkowe właściwości mechaniczne takie jak wysoka wytrzymałość w odniesieniu do masy, kontrolowany proces deformacji oraz doskonałe właściwości energochłonne znalazły szerokie zastosowanie w inżynierii kosmicznej, elementach nośnych pojazdów samochodowych oraz lotnictwie [1-5].

Przez wzgląd na budowę dzieli się je na dwie główne grupy: struktury dwuwymiarowe (2D) oraz trójwymiarowe (3D). Pierwsze powstają poprzez „wyciągnięcie” płaskiego kształtu w kierunku normalnym do płaszczyzny. Drugie cechują się budową kratownicową lub powierzchniową. Najpopularniejszym kształtem jest struktura plastra miodu (ang. honeycomb). Badania nad nią zapoczątkowali Gibson i Ashby w latach 80. XX wieku [6]. Wraz z rozwojem technologii przyrostowych oraz systemów komputerowych powstało wiele prac, w których poddano analizom różne kształty komórek.

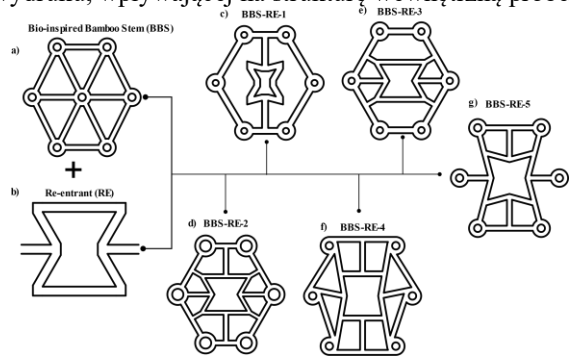
W niniejszej pracy przedstawiono nowe topologie 2D, oparte na wynikach badań ujętych w [7], w której autorzy porównali 20 topologii. Spośród nich wybrano topologie inspirowaną pędem bambusa (BBS) oraz re-entrant (RE). Łącząc cechy geometryczne obu kształtów, opracowano geometrie przedstawione na rys. 1.

2. Wyznaczenie właściwości materiału

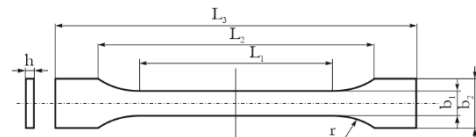
Do wytworzenia struktur wykorzystano filament PET-G. Próbkę do badań materiałowych oraz topologie wykonano w technologii Fused Deposition Modeling (FDM) przy użyciu drukarki Prusa i3 MKS3S. Próbkę wiósełkową przygotowano zgodnie z normą ASTM D638-14, ich wymiary charakterystyczne przedstawiono na rys. 2. Quasi-statyczną próbę rozciągania przeprowadzono za pomocą uniwersalnej maszyny wytrzymałościowej ElectroForce

3300, w temperaturze otoczenia 23°C. Wyniki zestawiono na rys. 3.

Otrzymane charakterystyki wykazują dwa wyraźne trendy, co jest bezpośrednim rezultatem zdefiniowanej ścieżki wydruku, wpływającej na strukturę wewnętrzną próbek.

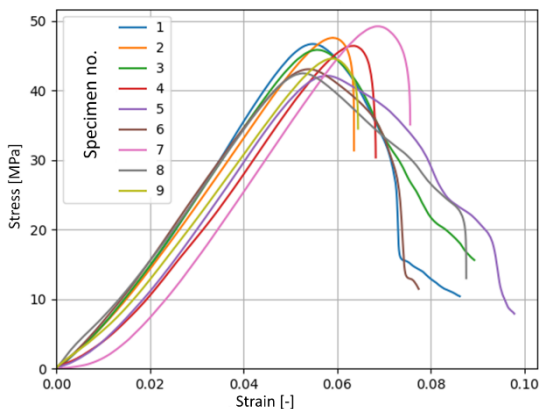


Rys. 1. Topologie bazowe: a) BBS, b) RE oraz topologie autorskie c) – f)



L ₁	L ₂	L ₃	L ₀	r	h	b ₁	b ₂
25	65	105	25	72	3	9	14.7

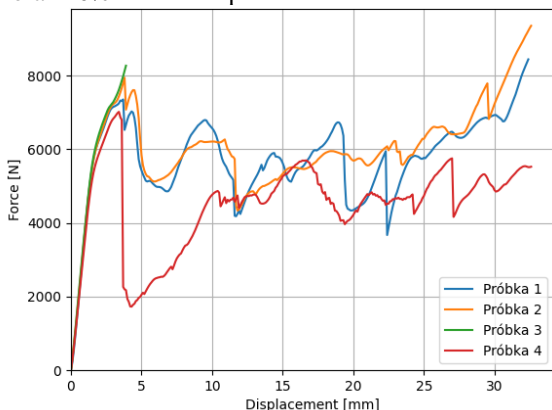
Rys. 2. Wymiary próbki wiósełkowej do wyznaczenia parametrów materiałowych (w mm) [8]



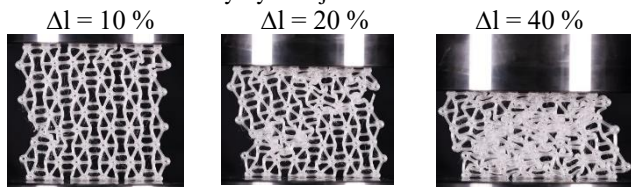
Rys. 3. Zestawienie krzywych z próby rozciągania

3. Próba quasi-statycznego ściskania

Do przeprowadzenia próby quasi-statycznego ściskania użyto uniwersalnej maszyny wytrzymałościowej MTS Criterion C.45.105. Na rys. 4 przedstawiono charakterystykę deformacji jednej z badanych topologii w postaci wykresu siła – przemieszczenie. Średnia maksymalna wartość siły w pikie wyniosła ok. 7,5 kN. Zaobserwowano plateau w szerokim zakresie, od 5 mm do 25 mm. Na rys. 5. przedstawiono wybrane etapy deformacji struktury dla 10%, 20% oraz 40% skrócenia próbki.



Rys. 4. Charakterystyka siła przemieszczenie dla topologii hybrydowej BBS-RE

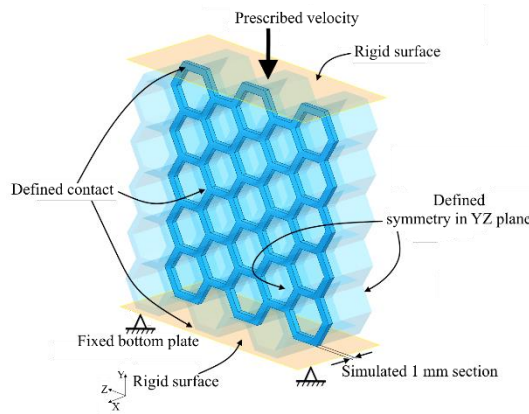


Rys. 5. Etapy deformacji topologii BBS-RE

4. Numeryczne modelowanie próby ściskania

Do zamodelowania PET-G zastosowano elasto-plastyczny model materiału, który uwzględnia mechanizmy osłabienia oraz zniszczenia. W celu skorelowania modelu materiałowego przyjęto metodykę zaproponowaną we wcześniejszych pracach autorów [7, 9, 10]. Próbę ściskania zamodelowano w środowisku LS-Dyna. Ze względu na silną nieliniowość zagadnienia użyto jawnego schematu całkowania. Zbadano wpływ wielkości siatki elementów na wyniki i ustalono, że minimalna liczba elementów na grubości ścianki wynosi 4. Topologie zostały zbudowane z ośmiowęzłowych elementów bryłowych, natomiast trawersy

zamodelowano jako elementy nieodkształcalne. W celu ograniczenia potrzebnej mocy obliczeniowej zadano warunek symetrii modelujący płaski stan odkształcenia. Ideowy schemat warunków początkowo- brzegowych przedstawiono na rys. 6



Rys. 6. Schematyczne przedstawienie warunków początkowo-brzegowych wykorzystanych w analizach [7]

5. Wnioski

W pracy zaprezentowano autorskie topologie, których właściwości zbadano w próbie quasi-statycznego ściskania. Nowe geometrie otrzymane z połączenia dwóch struktur: BBS oraz RE wykazały lepsze właściwości energochłonne, niż bazowe. Względem topologii BBS otrzymano stabilniejszą postać deformacji, co widać porównując charakterystyki deformacji. W odniesieniu do topologii RE średnia wartość siły deformacji została zwiększona.

W kolejnych etapach planowane są dalsze badania w zakresie dużych szybkości odkształcenia, w tym na młocie spadowym oraz testy balistyczne. Ponadto rozszerzone badania optymalizacyjne pod kątem jak najefektywniejszej absorpcji energii.

Literatura

- [1] Leary M, Mazur M, Williams H, Yang E, Alghamdi A, Lozanovski B, et al. Inconel 625 lattice structures manufactured by selective laser melting (SLM): Mechanical properties, deformation and failure modes. *Materials and Design*, 157:179–99, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.06.010>.
- [2] Bai L, Zhang J, Chen X, Yi C, Chen R, Zhang Z. Configuration optimization design of Ti6Al4V lattice structure formed by SLM. *Materials*, 11, 2018. <https://doi.org/10.3390/ma11101856>.
- [3] Rad MS, Hatami H, Ahmad Z, Yasuri AK. Analytical solution and finite element approach to the dense re-entrant unit cells of auxetic structures. *Acta Mechanica*, 230:2171–85, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00707-019-02387-x>.
- [4] Kladovasilakis N, Tsongas K, Tzetzis D. Mechanical and fea-assisted characterization of fused filament fabricated triply periodic minimal surface structures. *Journal of Composites Science*, 5, 202. <https://doi.org/10.3390/jcs5020058>.
- [5] Peng C, Fox K, Qian M, Nguyen-Xuan H, Tran P. 3D printed sandwich beams with bioinspired cores: Mechanical performance and modelling. *Thin-Walled Structures*, 161:107471, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107471>.
- [6] Gibson LJ, Ashby MF, Schajer GS, Robertson CI. The mechanics of two-dimensional cellular materials. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 382:25–42, 1982. <https://doi.org/10.1098/rspa.1982.0087>.
- [7] Majdak M., Baranowski P., Małachowski J, Numerical studies of the energy absorption capacities and deformation mechanisms of 2D cellular topologies. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 24: 111, 2024. <https://doi.org/10.1007/s43452-024-00926-5>.

- [8] ASTM D638-14, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- [9] Konarzewski M, Kucewicz M, Baranowski P, Stankiewicz M, Konarzewski M, Płatek P, et al. Modelling and testing of 3D printed cellular structures under quasi-static and dynamic conditions. *Thin-Walled Structures*, 145, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106385>.
- [10] Kucewicz M, Baranowski P, Małachowski J. A method of failure modeling for 3D printed cellular structures. *Materials and Design*, 174, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107802>