

Ocena jakościowa procesu deformacji regularnych struktur komórkowych wykonanych techniką druku 3D

Qualitative evaluation of the deformation process of regular cellular structures manufactured using 3D printing

PIOTR DZIEWIT
JACEK JANISZEWSKI*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.3.41>

Prezentowano wybrane wyniki badań eksperymentalnych, umożliwiające przeanalizowanie procesu deformacji regularnych struktur komórkowych wykonanych techniką druku 3D w warunkach obciążenia quasi-statycznego. Zaprojektowane w środowisku CAD warianty topologii struktur wykonano metodą FDM (*fused deposition modeling*), a następnie poddano je badaniom w warunkach jednoosiowego testu na ściskanie. Punktem wyjścia do opracowania poszczególnych wariantów struktur była topologia plastra miodu. Aby przeanalizować wpływ materiału struktury na przebieg procesu deformacji, próbki wykonano z trzech komercyjnie dostępnych materiałów: PC-10, ABSplus i Nylon12. Na podstawie wyników badań oceniono wpływ kształtu komórki elementarnej oraz rodzaju zastosowanego materiału na przebieg deformacji struktury i wartość energii odkształcenia plastycznego.

SŁOWA KLUCZOWE: struktury komórkowe, technika FDM, druk 3D, badania wytrzymałościowe, energochłonność, struktura plastra miodu, wklęsła struktura plastra miodu

*Presented are selected experimental results concerning the analysis of the deformation process of regular cellular structures manufactured using 3D printing under quasi-static loading conditions. The various structural topologies were designed and manufactured using the FDM (*fused deposition modelling*) and then tested in a uniaxial compression test. The starting point for the development of individual variants of structures was the honeycomb topology. In order to analyse the influence of the structure material on the deformation process, the samples were made from three commercially available materials: PC-10, ABSplus and Nylon12. Based on the results, the influence of the shape of the single cell and the type of material used on the deformation of the structure as well as the value of the plastic deformation energy were assessed.*

KEYWORDS: regular cellular structures, FDM technique, 3D printing, strength tests, energy absorption, honeycomb, re-entrant honeycomb

Techniki wytwarzania przyrostowego, powszechnie nazywane drukiem 3D, należą do istotnych osiągnięć technologicznych ostatniego wieku. Kształtują one rozwój wielu kluczowych gałęzi gospodarki, tj. przemysłu motoryzacyjnego, lotniczego, maszynowego, narzędziowego czy obronnego. Części wytwarzane technologiami addytywnymi znajdują także zastosowanie w medycynie, a nawet w architekturze, budownictwie czy we wzornictwie przemysłowym. Szeroka gama dostępnych technik wytwarzania w połączeniu z bogatym asortymentem materiałów budulcowych pozwalają uzyskiwać specyficzne właściwości mechaniczne produkowanych obiektów. Ponadto przyrostowy sposób wytwarzania zapewnia swobodę

projektowania geometrycznego, uzyskiwania kształtu, który niejednokrotnie nie jest wykonalny konwencjonalnymi, ubytkowymi technikami produkcji [1–3].

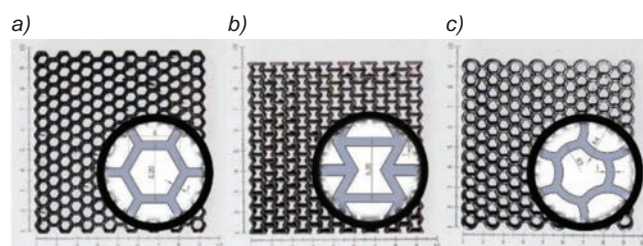
Regularne struktury komórkowe cechuje topologia o powtarzalnej komórce elementarnej. Dzięki tej właściwości można przyjąć, że wykazują one izotropowe lub ortotropowe właściwości mechaniczne [4]. Ponadto mają one małą gęstość względną z zachowaniem wysokich właściwości wytrzymałościowych w porównaniu z materiałami litymi, z których są zbudowane [5]. Materiały o budowie komórkowej znajdują zastosowanie w konstrukcji stref kontrolowanego zgniotu pojazdów mechanicznych, w elementach ochrony pasywnej czy odzieży ochronnej (hełmach, kaskach). Są stosowane jako wypełnienie struktur kompozytowych o budowie warstwowej (*sandwich*), które wykazują wyższą energochłonność niż lite płyty o takiej samej masie [6].

W niniejszej pracy przeprowadzono ocenę wpływu materiału oraz topologii struktury na przebieg procesu jej deformacji i zdolności do absorpcji energii odkształcenia plastycznego w warunkach obciążenia quasi-statycznego. Próbkę struktur obciążano siłą osiową na kierunku stycznym do powierzchni czołowej profilu struktury. Na potrzeby badań opracowano prostopadłościenną próbkę struktur, a następnie wykonano je w technologii druku 3D, metodą FDM, z trzech materiałów w polimerowych, tj.: kopolimeru akrylonitrylo-butadieno-styrenowego (ABSplus), poliwęglanu (PC-10) i poliamidu (Nylon12).

Charakterystyka topologii struktur wykorzystanych w badaniach

Wiele jest publikacji naukowych dotyczących wytwarzania i badania właściwości wytrzymałościowych regularnych struktur komórkowych typu 2D o topologii plastra miodu [5–8]. W tej pracy autorzy skupili się na porównaniu przebiegu procesu deformacji struktury plastra miodu i struktur będących jej pochodnymi. Na rys. 1 przedstawiono strukturę plastra miodu (a) oraz jej pochodne (b, c).

Jako kryterium oceny w porównaniu wpływu topologii struktury na jej właściwości energochłonne przyjęto wskaźnik będący stosunkiem wartości energii odkształcenia plastycznego E_p do gęstości relatywnej struktury ρ_r .



Rys. 1. Profil czołowy regularnych struktur komórkowych o topologii bazującej na strukturze plastra miodu – *honeycomb* (a) oraz jej modyfikacje: b) *re-entrant honeycomb* (struktura auksetyczna), c) *rounded honeycomb*

* Mgr inż. Piotr Dzięwit (piotr.dziewit@wat.edu.pl), dr hab. inż. Jacek Janiszewski prof. WAT (jacek.janiszewski@wat.edu.pl) – Instytut Techniki Uzbrojenia, Wydział Mechatroniki i Lotnictwa, Wojskowa Akademia Techniczna

Na początkowym etapie opracowania modeli geometrycznych struktur w środowisku CAD przyjęto założenia dotyczące wymiarów elementarnej komórki, grubości jej ścianki oraz wielkości wyjściowej próbki. Aby zapewnić warunki procesu deformacji zgodne z wytycznymi przedstawionymi w pracy [9], przyjęto, że poddana testom próbka struktury powinna zawierać co najmniej sześć komórek elementarnych zarówno na kierunku osi OX , jak i OY .

Przedstawione na rys. 1 pochodne struktury plastra miodu charakteryzują się zróżnicowanym kształtem elementarnej komórki, który determinuje wartość jej gęstości relatywnej. Gęstość relatywną pojedynczej komórki rozpatrywanych struktur zdefiniowano w następujący sposób:

- **komórka sześciennego plastra miodu** (rys. 1a):

$$\rho_r = \frac{t(2R + t)}{(R + t)^2}$$

gdzie: t – grubość ścianki, R – promień okręgu wpisanego w komórkę; rozpatrywany model struktury zawiera 203 komórki i jest zdefiniowany przez następujące parametry: $t = 1$ mm, $R = 2,6$ mm, $\rho_r = 0,30$;

- **komórka auksetycznego plastra miodu** (rys. 1b):

$$\rho_r = \frac{7t^2 + 16Rt}{6R^2 + 14Rt + 7t^2}$$

– model komórki powstał w wyniku przekształcenia struktury plastra miodu o promieniu okręgu wpisanego w komórkę $R = 2,6$ mm; rozpatrywany model struktury zawiera 188 komórek, a jej parametry są następujące: $t = 1$ mm, $\rho_r = 0,42$ mm;

- **komórka zaokrąglonego plastra miodu** (rys. 1c):

$$\rho_r = \frac{\pi(R + t)^2 - \pi R^2}{(R + t)^2 \left[\pi - 3 \left(\frac{\alpha}{360} \pi - \frac{\sin \alpha}{2} \right) \right] + \frac{3R^2\sqrt{3} - 2\pi R^2}{4}}$$

$$\alpha = \arccos \left(1 - \frac{R^2}{2(R + t)^2} \right)$$

– model komórki powstał w wyniku przekształcenia struktury plastra miodu i zaokrąglenia ścianek komórek do uzyskania krzywizny wewnętrznej o promieniu $R = 3$ mm; rozpatrywany model struktury zawiera 188 komórek i został scharakteryzowany następującymi parametrami: $t = 1$ mm, $\rho_r = 0,32$ mm.

Charakterystyka procesu wytwarzania regularnych struktur komórkowych

Do wykonania modeli rzeczywistych badanych struktur wykorzystano komercyjne drukarki 3D Dimension SST 1200es i Fortus 900mc (Stratasys Corp.). W porównaniu z powszechnie dostępnymi tanimi drukarkami 3D urządzenie Dimension SST 1200es charakteryzuje się zamkniętym obszarem roboczym z dodatkowym systemem grzewczym, zapewniającym niezmiennie warunki pracy i ograniczającym skurcz materiału w trakcie procesu [9]. Z kolei drukarka Fortus 900mc to profesjonalne przemysłowe urządzenie, które pozwala na wykorzystanie szerszej gamy materiałów niż drukarka Dimension SST 1200es.

Metodyka badań doświadczalnych w warunkach obciążenia quasi-statycznego

Badania przeprowadzono z użyciem maszyny wytrzymałościowej MTS Criterion C45. Poprzedzono je testami bazującymi na metodyce quasi-statycznej próby rozciągania

w celu określenia właściwości wytrzymałościowych próbek wydrukowanych zgodnie z parametrami roboczymi zastosowanymi w trakcie wytwarzania struktur. W tym celu przygotowano próbki o kształcie i wymiarach zgodnych z normą ISO 527-2-1B.

Wyniki statycznej próby rozciągania przedstawiono w tabl. I.

TABLICA I. Właściwości materiałów wykorzystanych do wytwarzania próbek struktur komórkowych (stratasys.com [10], badania własne – kolor czerwony)

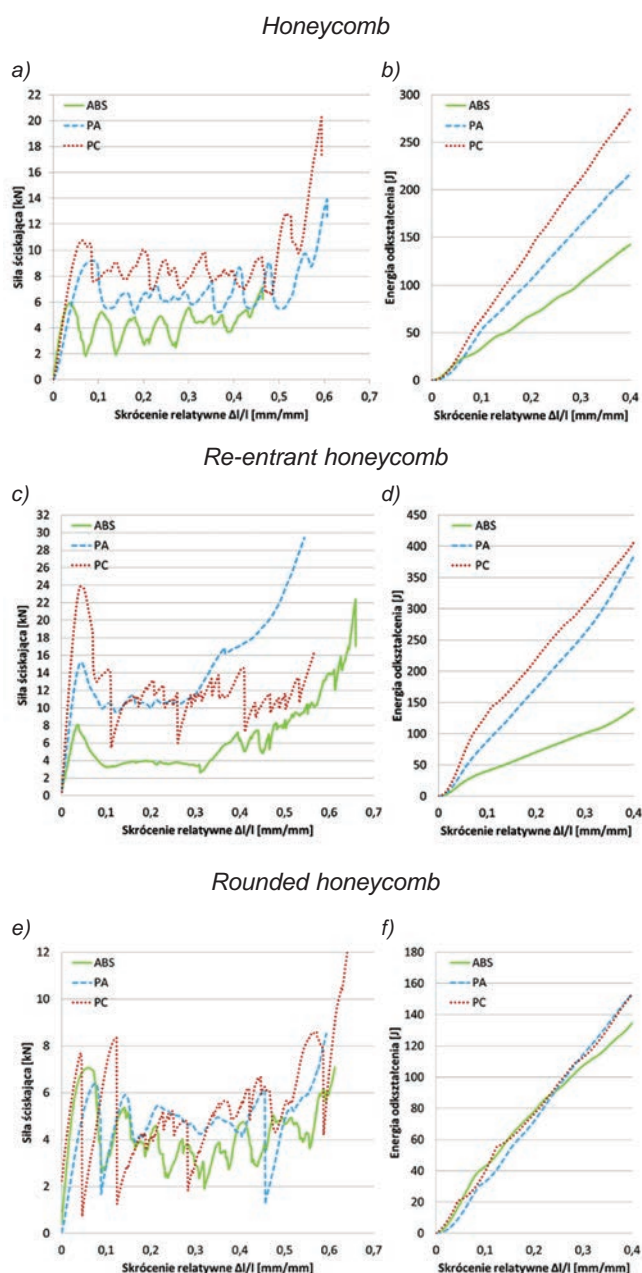
Materiał	Gęstość, g/mm ³	R_m , MPa	E , MPa	A , %
ABSplus (ABS)	1,04	31 (22)	2200	6 (8)
Nylon12 (PA)	1,00	46 (37)	1282	30 (13,5)
PC-10 (PC)	1,20	57 (47)	1944	4,8 (6,7)

Na rys. 2 zaprezentowano krzywe siła–skrócenie dla badanych struktur komórkowych, otrzymane przy prędkości przemieszczenia się trawersy wynoszącej 1 mm/s. Jako główne kryterium oceny struktury przyjęto wartość energii odkształcenia plastycznego uzyskaną dla skrócenia próbki na poziomie 40%.

Na rys. 2a–b przedstawiono wyniki badań uzyskane dla struktury plastra miodu – *honeycomb* (rys. 1a) – w zależności od zastosowanego rodzaju materiału. Można zauważyć, że na pierwszym etapie deformacji nachylenie krzywej siła–skrócenie koreluje z wartościami modułu Younga poszczególnych materiałów, gdzie ABS wykazuje największą sprężystość (sztywność), natomiast nylon – najmniejszą. Dalszy etap procesu deformacji charakteryzuje się skokową zmianą wartości siły, będącą wynikiem postępującego niszczenia struktury. Liczba skoków jest bezpośrednio związana z liczbą szeregów komórek, które załamują się pod wpływem obciążania. Warto zauważyć, że poliamid, o wysokiej ciągliwości, wykazuje łagodny przebieg w porównaniu z poliwęglanem i ABS-em. Na podstawie tych obserwacji można założyć, że właściwości materiału rdzenia mają wyraźny wpływ na przebieg procesu deformacji struktury plastra miodu i wraz ze wzrostem wytrzymałości materiału uzyskuje się wyższą zdolność do absorpcji energii odkształcenia plastycznego.

Drugim rozpatrywanym wariantem topologii była struktura o właściwościach auksetycznych – *re-entrant honeycomb* (rys. 1b) – która wykazuje ujemny współczynnik Poissona [11]. Struktura ta (sześciokąt o dwóch wklęsłych krawędziach) charakteryzuje się bardzo wysokimi parametrami wytrzymałościowymi na pierwszym etapie odkształcenia (rys. 2c). Efekt ten wynika z dużej liczby komórek elementarnych i dużej gęstości relatywnej struktury, co zwiększa jej sztywność. Gdy obciążenie przekracza wartość krytyczną, następuje gwałtowny proces niszczenia pasma komórek, wywołujący skokowy spadek siły. Na kolejnym etapie ściskania struktury wykonanej z ABS i PA przebieg charakterystyki siły w funkcji odkształcenia względnego jest niemal liniowy. Topologia tego rodzaju dla tych materiałów odkształca się głównie poprzez zginanie, bez wyraźnych przerw w ciągłości materiału. Przebieg deformacji poliwęglanu (PC) postępuje gwałtownie, co jest determinowane przez kruche pękanie próbki. Jednakże niezależnie od etapu drugiego parametry wytrzymałościowe materiału struktury nadal determinują naturę przebiegu deformacji.

Wyniki badań trzeciego wariantu topologii – *rounded honeycomb* (rys. 1c) – podobnie jak w przypadku poprzednich struktur, wskazują że sztywność struktury jest determinowana głównie przez wytrzymałość materiału. Jednakże wartość krytyczna siły, przy której obserwuje się inicjację niszczenia struktury, jest porównywalna dla wszystkich trzech materiałów, co może oznaczać, że nie wytrzymałość na rozciąganie, a geometria struktury odpowiada za dalszy przebieg deformacji. W analizowanym przypadku potwierdzona została tendencja do kruchego pęknięcia struktur wykonanych z poliwęglanu i ABS. W przypadku poliamidu, charakteryzującego się większą ciągliwością, przebieg krzywej cechuje się mniejszymi fluktuacjami siły maksymalnej. Analizując wartości uzyskanej energii odkształcenia plastycznego (tabl. II), można stwierdzić, że dla wszystkich trzech materiałów są one zbliżone. Z tego wynika, że topologia struktury należy do kluczowych czynników determinujących zdolność tej struktury do absorpcji energii uderu.



Rys. 2. Wykres zależności siły (a, c, e) i energii odkształcenia plastycznego (b, d, f) w funkcji skrócenia względnego struktury komórkowej w próbie jednoosiowego ściskania dla wybranych topologii: *honeycomb*; *re-entrant honeycomb*; *rounded honeycomb*

TABLICA II. Wyniki analizy energii absorpcji w odniesieniu do gęstości relatywnej dla odkształcenia 5% (w nawiasie podano energię odkształcenia bez uwzględnienia ρ_r)

	ABSplus, J	Nylon12, J	PC-10, J
Próbka do rozciągania (tabl. I)	23,3	28,5	33,9
<i>Honeycomb</i> (rys. 1a)	72,9 (21,87)	66,4 (19,91)	97,7 (29,3)
<i>Re-entrant honeycomb</i> (rys. 1b)	52,3 (22,0)	96,6 (40,6)	152,9 (64,2)
<i>Rounded honeycomb</i> (rys. 1c)	81,4 (26,04)	51,0 (16,3)	72,0 (23,1)

Podsumowanie

Na podstawie przedstawionych wyników można stwierdzić, że wybrana technika wytwarzania struktur pozwala dokonać szybkiej oceny zdolności do absorpcji energii w zależności od topologii struktury. Zastosowanie trzech rodzajów materiałów, istotnie różniących się właściwościami mechanicznymi, pozwoliło na sformułowanie wniosku (zgodnego z oczekiwaniami), że właściwości wytrzymałościowe materiału użytego do wykonania struktury mają znaczący wpływ na maksymalną wartość energii odkształcenia. Należy jednak podkreślić, że dominującym czynnikiem warunkującym przebieg deformacji struktury jest rodzaj zastosowanej topologii. Struktury o właściwościach auksetycznych wykazują małe fluktuacje siły. Pozostałe struktury ulegają zniszczeniu głównie w wyniku pęknięcia ścianek w węzłach poszczególnych szeregów komórek. Ponadto potwierdzono, że przy wyborze budulca struktury do pochłaniania energii uderu należy poszukiwać materiału o wysokiej ciągliwości. Dzięki temu proces niszczenia struktury odbywa się poprzez zginanie ścianek, a co za tym idzie, przy mniejszych fluktuacjach siły (naprężenia).

Autorzy wyrażają wdzięczność dr. inż. Pawłowi Płatkowi z Wojskowej Akademii Technicznej za pomoc w wykonaniu wydruków struktur komórkowych. Artykuł zawiera wyniki pracy finansowanej przez WML WAT ze środków na naukę w latach 2017–2018, jako projekt badawczy nr RMN/718/2017.

LITERATURA

1. Campanelli S.L., Contuzzi N., Ludovico A.D., Caiazzo F., Cardaropoli F., Sergi V. "Manufacturing and characterization of Ti6Al4V lattice components manufactured by selective laser melting". *Materials*. 7, 6 (2014): s. 4803–4822.
2. Ozdemir Z., Hernandez-Nava E., Tyas A., Warren J.A., Fay S.D., Goodall R., Askes H. "Energy absorption in lattice structures in dynamics: Experiments". *International Journal of Impact Engineering*. 89 (2016): s. 49–61.
3. Vaezi M., Chianrabutra S., Mellor B., Yang S. "Multiple material additive manufacturing. Part 1: A review. *Virtual and Physical Prototyping*. 8, 1 (2013): s. 19–50.
4. Babaei S., Jahromi B.H., Ajdari A., Nayeb-Hashemi H., Vaziri A. "Mechanical properties of open-cell rhombic dodecahedron cellular structures". *Acta Materialia*. 60, 6–7 (2012): s. 2873–2885.
5. Li Yang et al. "Low-energy drop weight performance of cellular sandwich panels". *Rapid Prototyping Journal*. 21, 4 (2005): s. 433–442.
6. Ajdari A., Nayeb-Hashemi H., Vaziri A. "Dynamic crushing and energy absorption of regular, irregular and functionally graded cellular structures". *International Journal of Solids and Structures*. 48, 3–4 (2011): s. 506–516.
7. Lee J., Huang A. "Fatigue analysis of FDM materials". *Rapid Prototyping Journal*. 19, 4 (2013): s. 291–299.
8. Hyun S., Torquato S. "Effective elastic and transport properties of regular honeycombs for all densities". *Journal of Materials Research*. 15, 9 (2000): s. 1985–1993.
9. Lira C., Scarpa F. "Transverse shear stiffness of thickness gradient honeycombs". *Composites Science and Technology*. 70, 6 (2010): s. 930–936.
10. www.stratasys.com/ (dostęp: 01.09.2017).
11. Yang L., Harrysson O., West H., Cormier D. "Mechanical properties of 3D re-entrant honeycomb auxetic structures realized via additive manufacturing". *International Journal of Solids and Structures*. 69–70 (2015): s. 475–490.