

Badania struktur komórkowych typu *hollow sphere* wytwarzanych metodą selektywnego spiekania laserowego

Investigations of hollow sphere structures produced by selective laser sintering

KAMIL CIEPLAK
TOMASZ MAJEWSKI*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.7.50>

Opisano badania struktur *hollow sphere*, wykorzystanych jako absorbery energii mechanicznej. W pierwszej części artykułu przedstawiono techniki obróbki addytywnej – selektywnego spiekania laserowego – jako optymalnej metody wytwarzania próbek w przypadku badań laboratoryjnych. W kolejnej części zaprezentowano zastosowanie komputerowego wspomaganego projektowania do tworzenia parametrycznych trójwymiarowych modeli badanych struktur. Następnie przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych w warunkach quasi-statycznego obciążenia tych materiałów. Na podstawie zebranych danych przeprowadzono analizę jakościową procesu deformacji struktur oraz wyciągnięto wnioski.

SŁOWA KLUCZOWE: budowa i eksploatacja maszyn, materiały komórkowe, selektywne spiekanie laserowe

The research of hollow sphere structures as absorbers of mechanical energy is described. The first part of the article is devoted to the description of selective laser sintering additive technique as the optimal method of sample production in the case of laboratory tests. The next part presents the use of computer aided design to create parametric three-dimensional models. Next, the results of experimental tests in the conditions of quasi-static load are presented. Based on the collected data, a qualitative analysis of the structure deformation process was performed and final conclusions are presented.
KEYWORDS: machine design and maintenance, cellular materials, selective laser sintering

Wprowadzenie

Artykuł stanowi kontynuację prac związanych z badaniami nad strukturami trójwymiarowymi o topologii nazywanej *hollow sphere* (w skrócie: HS). Na bazie tej topologii można projektować wiele wariantów struktur, różniących się m.in. sposobem rozlokowania komórek w całej objętości struktury, wielkością komórek czy grubością ich ścian.

W dalszych pracach skupiono się na określeniu znaczenia wielkości komórki i grubości jej ściany, które bezpośrednio determinują uzyskaną gęstość względną materiału. Wykorzystanie technik przyrostowych do wstępnego przebadania właściwości mechanicznych różnych wariantów struktur jest powszechną praktyką [1]. Techniki addytywne umożliwiają wykonywanie próbek o powtarzalnych parametrach wytrzymałościowych.

Niestety większość oferowanych na rynku systemów wprowadza ograniczenia pod względem wyboru materiałów oraz parametrów geometrycznych uwarunkowanych technologicznie. Kolejnym utrudnieniem jest brak możliwości uzyskania struktury o zamkniętych i pustych w środku porach. W związku z tym badane próbki zawie-

rają zamknięty wewnątrz porów materiał podporowy. Aby uniknąć tej wady, trzeba zmodyfikować geometrię poprzez wprowadzanie otworów technologicznych pozwalających na opróżnienie wnętrza komórek.

W pierwszym przypadku należy uwzględnić wpływ materiału podporowego, znajdującego się w komórkach, na uzyskaną charakterystykę pochłaniania energii mechanicznej. Utrudnione jest również jednoznaczne określenie poprawności wykonania próbki, jeśli za kryterium oceny przyjmuje się porównanie uzyskanej masy z masą wyznaczoną np. w programie do komputerowego wspomaganego projektowania. W przypadku wprowadzenia otworów technologicznych należy się spodziewać zmniejszenia wytrzymałości mechanicznej materiału komórkowego.

Metoda selektywnego spiekania laserowego (SLS)

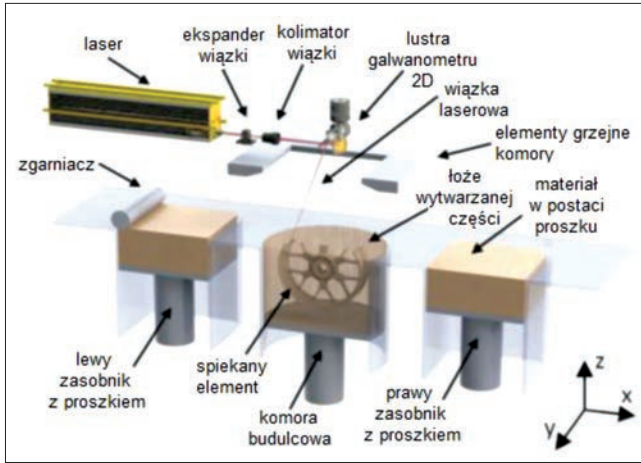
Wydział Mechatroniki i Lotnictwa Wojskowej Akademii Technicznej dysponuje drukarką Sinterit Lisa wykorzystującą metodę selektywnego spiekania laserowego (*selective laser sintering* – SLS). Metoda ta polega na spiekaniu proszków polimerów, m.in. poliamidu PA12 z dodatkiem węgla, za pomocą silnego źródła energii w postaci wiązki lasera. Proszek znajdujący się wewnątrz maszyny przemieszczany jest za pomocą układu zgarniającego z przestrzeni złoża zasilającego do złoża, w którym wykonywany jest wydruk. W pojedynczym taktie nakłada się jedną warstwę.

W zależności od budowy maszyny rozróżnia się kilka metod przemieszczania wiązki lasera kierowanej na powierzchnię wydruku. W pierwszym przypadku wiązka przemieszcza się niezależnie do źródła lasera, z użyciem systemu optycznego (rys. 1). To rozwiązanie pozwala na wykorzystanie więcej niż jednego źródła wiązki laserowej, kierowanej za pomocą układu luster. W drugim przypadku układ składający się m.in. z diody laserowej, soczewki oraz systemu chłodzącego znajduje się na wózku jeżdżącym podobnie jak w ploterach 2D. To rozwiązanie wykorzystuje się głównie w małych systemach, od których nie jest wymagana duża dokładność. Większość materiału (ok. 70%) z poprzedniego procesu wykorzystana jest ponownie [3], po uprzednim odsianiu zanieczyszczeń powstających w procesie spiekania.

Zarówno materiał zastosowany do badań, jak i oprogramowanie dostarczył producent drukarki. W celu uzyskania powtarzalności eksperymentów wszystkie próbki były wykonywane w tej samej orientacji oraz z identycznymi parametrami druku, m.in. wysokością warstwy 0,15 mm. W ramach weryfikacji dla każdej serii wydruków wykonywano próbkę materiałową zgodnie z normą ISO527 [4].

* Mgr inż. Kamil Cieplak, kamil.cieplak@wat.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0002-0825-2689> – Wydział Mechatroniki i Lotnictwa, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, Polska
Dr hab. inż. Tomasz Majewski, tomasz.majewski@wat.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0003-2850-1205> – Wydział Mechatroniki i Lotnictwa, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, Polska

Na podstawie wyników statycznej próby rozciągania dla kolejnych partii próbek otrzymano moduł Younga na poziomie $0,613 \pm 0,038$ GPa oraz odkształcenie przy zerwaniu $0,138 \pm 0,002$ mm/mm. Uzyskane wartości siły rozrywającej oraz odkształcenia próbki przygotowanej w badaniach wstępnych mogą wynikać z modyfikacji systemu operacyjnego drukarki SLS wprowadzonych w trakcie badań.



Rys. 1. Schemat działania drukarki SLS [2]

Parametryzacja trójwymiarowego modelu struktury HS

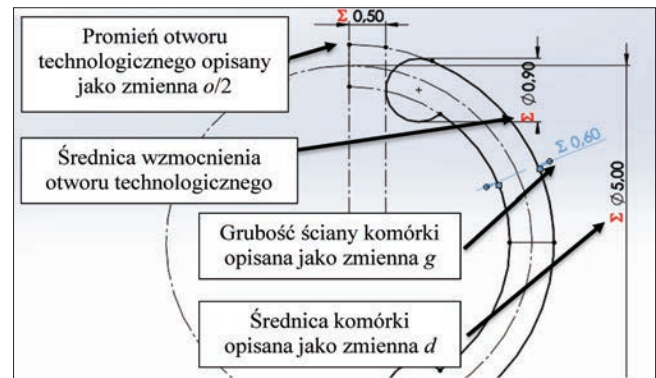
Programy do komputerowego wspomaganego projektowania umożliwiają wykonywanie parametrycznych modeli trójwymiarowych. Pozwala to na zdecydowane skrócenie czasu generowania modeli trójwymiarowych oraz eliminuje wprowadzanie błędów w trakcie modelowania.

Wykonanie modelu parametrycznego wymaga określenia wielkości geometrycznych, które będą modyfikowane, oraz ich wpływu na inne parametry.

Korzystając z edytora równań, tworzy się zmienne i nadaje im jednoznaczne nazwy, które następnie są wykorzystywane do definiowania geometrii modelu, m.in. parametr oznaczający grubość ścianki komórki oraz opisujący średnicę komórki. Następnie zmienne określające inne wymiary geometryczne przedstawia się z wykorzystaniem już zdefiniowanych. Końcowy kształt modelu próbki zostaje dopasowany pod kątem przeprowadzenia badań dynamicznych z wykorzystaniem dzielonego pręta Hopkinsona, w skrócie SHPB (*Split Hopkinson Pressure Bar*).

Zastosowanie próbek o podobnych wymiarach geometrycznych w eksperymentach statycznych i dynamicznych pozwoliło na jakościowe porównywanie uzyskanych wyników. Założono, że w przypadku badań prowadzonych na stanowisku SHPB ich wielkość nie może przekroczyć średnicy zastosowanego pręta, wynoszącej 36 mm.

W ramach badań wykonano dwa modele parametryczne HS z zamkniętymi porami oraz z zastosowa-



Rys. 2. Szkielet komórki HS z otworami technologicznymi

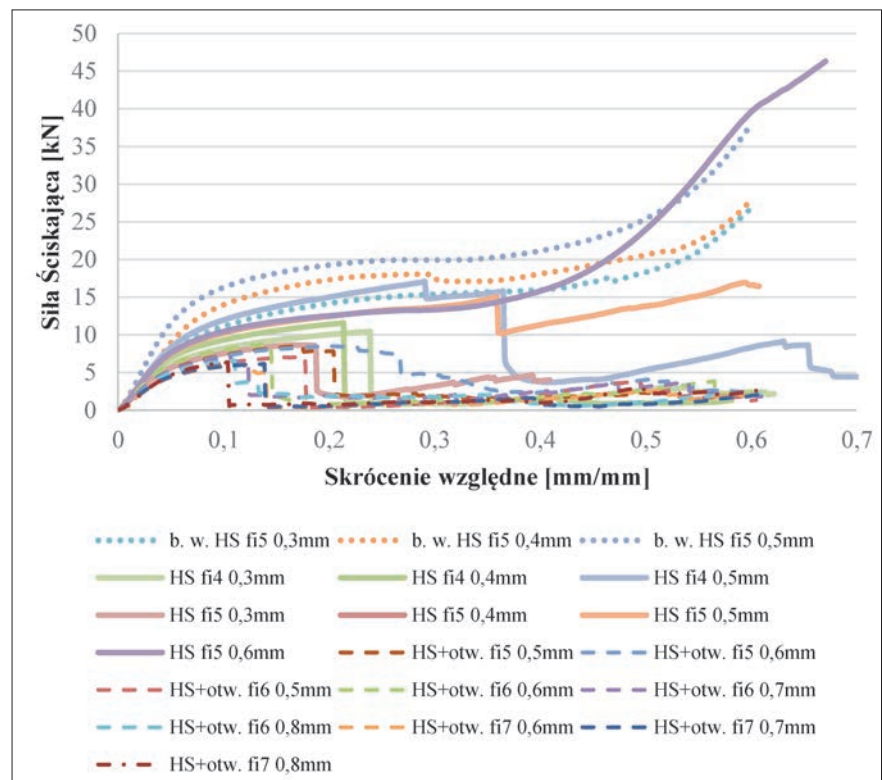
nymi otworami technologicznymi. Kształt pojedynczej komórki w wariancie z otwartymi komórkami przedstawiono na rys. 2.

Badania eksperymentalne właściwości mechanicznych struktur HS

Do statycznej próby ściskania wykorzystano maszynę MTS Criterion Model 45. Badania przeprowadzono dla prędkości trawersy wynoszącej 1 mm/s.

We wstępnych próbach wykorzystano próbki o podstawie kwadratu, aby określić wpływ grubości ścianki na absorpcję energii mechanicznej. Uzyskane przebiegi siły w funkcji skrócenia względnego dla grubości ścianki 0,3 mm; 0,4 mm oraz 0,5 mm przedstawiono na rys. 3.

Można zauważyć wyraźny wpływ parametrów geometrycznych próbek na zarejestrowane przebiegi siły. Charakter uzyskanych krzywych jest podobny jak w przypadku materiałów uznawanych za energochłonne, co przedstawiono na rys. 4 [5]. Otrzymane wartości przeliczono na wartości energii w funkcji skrócenia względnego oraz zestawiono na rys. 5.

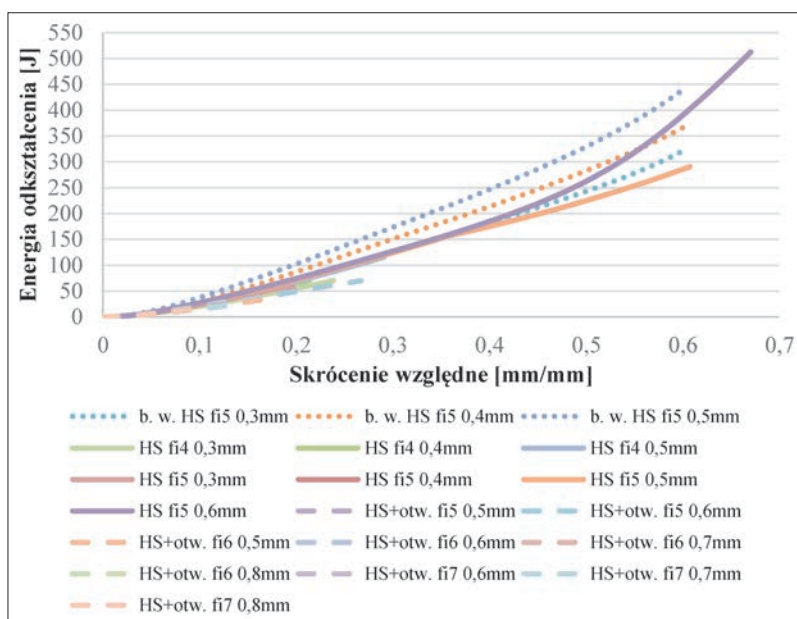


Rys. 3. Zbiorczy wykres zależności siły w funkcji skrócenia względnego uzyskanych z prób: badania wstępne HS, próba zasadnicza HS oraz HS z otworami

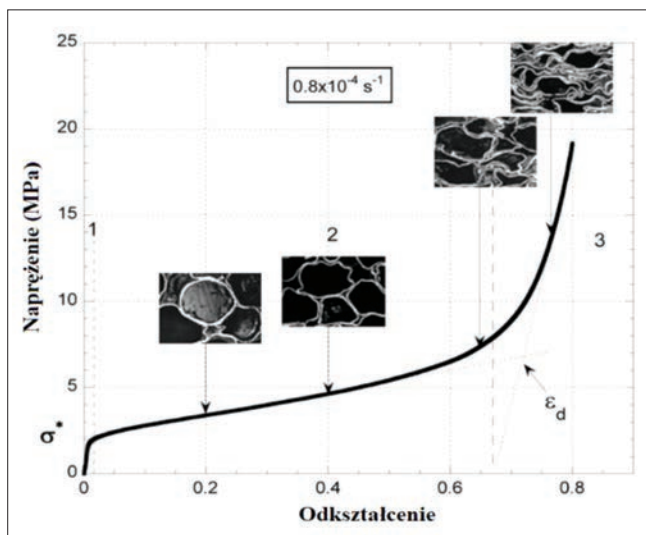
Na kolejnym etapie przebadano próbki o kształcie cylindrycznym, z materiałem podporowym wewnątrz zamkniętych komórek. Uzyskane przebiegi siły w funkcji skrócenia względnego przedstawiono na rys. 3.

Na podstawie badań stwierdzono, że tylko w niektórych przypadkach uzyskano przebiegi deformacji zbliżone do zaobserwowanych w badaniach wstępnych. Jest to prawdopodobnie związane ze zmniejszeniem liczby komórek w przekroju poprzecznym struktury. W związku z tym, aby wykonać wykresy zmian energii odkształcenia w funkcji skrócenia względnego, uwzględniano przebiegi do momentu zniszczenia struktury, widoczne jako duży spadek siły. Charakterystyki przedstawiono na rys. 5.

Analogicznie przeprowadzono badania struktur HS zmodyfikowanych o otwory technologiczne. Zależność siły w funkcji skrócenia względnego przedstawiono na rys. 3, natomiast energię odkształcenia w funkcji skrócenia względnego – na rys. 5.



Rys. 5. Zbiórny wykres zależności energii odkształcenia w funkcji skrócenia względnego, uzyskanych z prób: badania wstępne HS, próba zasadnicza HS oraz HS z otworami



Rys. 4. Krzywa quasi-statyczna naprężenie-odkształcenie dla HS [5]

Analiza wyników

Wyniki badań przeprowadzonych dla ostatecznych geometrii próbek w niewielkim zakresie korespondują z rezultatami badań wstępnych. Duży wpływ miała na to mała liczba komórek w przekroju poprzecznym, co prawdopodobnie stanowi główny powód zniszczenia próbki w momencie przejścia z zakresu sprężystego w zakres zapaдания struktury. Zmniejszenie wielkości komórek nie jest możliwe ze względu na ograniczenia technologiczne.

Jakościowa ocena uzyskanych przebiegów pozwala stwierdzić, że struktury o małych komórkach i grubej ścianie komórkowej (większej gęstości relatywnej) umożliwiają absorpcję większej ilości energii. Widoczne jest wyraźne pogorszenie właściwości mechanicznych struktury zmodyfikowanej o wprowadzone otwory technologiczne, przejawiające się zniszczeniem struktury po przekroczeniu zakresu sprężystego.

Najlepsze rezultaty z wykorzystaniem tego materiału obserwuje się dla wariantu HS o wielkości komórki ok. 5 mm i grubości ścianki ok. 0,6 mm, czyli dla gęstości relatywnej wynoszącej ok. 30%.

Podsumowanie

Wykonanie modelu parametrycznego pozwoliło na uzyskanie geometrii w krótszym czasie, a dodatkowo zapobiegło błędom w procesie projektowania kolejnych wariantów. Technika addytywna, jaką jest SLS, umożliwiła wykonanie wielu wariantów próbek o bardzo zbliżonych parametrach materiałowych.

Z badań wyciągnięto wniosek, że w kolejnych eksperymentach należałoby użyć materiału o większej elastyczności niż charakteryzuje badany poliamid PA12 z dodatkiem węgla. Badania quasi-statyczne materiałów spiekanych oraz struktur trzeba powtórzyć. Różnice maksymalnych wartości siły pomiędzy strukturą zmodyfikowaną (przez dodanie otworów technologicznych) i niemodyfikowaną mogą wynikać z obecności proszku wewnątrz zamkniętych komórek.

Przeprowadzenie testów dynamicznych na SHPB będzie uzasadnione w przypadku, gdy badane struktury będą wykazywać właściwości materiałów energochłonnych. W toku dalszych prac należy przede wszystkim rozpatrywać warianty struktur o gęstości względnej nie mniejszej niż 30%.

Artykuł zawiera wyniki pracy finansowanej przez WML WAT ze środków na naukę w latach 2018–2019, jako projekt badawczy nr RMN/951/2018.

LITERATURA

- [1] Płatek P., Baranowski P., Cieplak K., Sarzyński M., Sienkiewicz J., Janiszewski J., Małachowski J. "Investigation on deformation process of cellular structures with gradient topology manufactured additively". *AIP Conference Proceedings*. (2018) 020108-1. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5092111>.
- [2] Kleijna R.G., Sesseg J.P.W., Schmid M., Wegener K. "Insights into the development of a short-fiber reinforced polypropylene for laser sintering". *AIP Conference Proceedings*. (2017) 190002-2. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5016791>.
- [3] www.sinterit.com/wp-content/uploads/2014/05/PA12-Specification.pdf (dostęp: 01.04.2019 r.).
- [4] PN-ISO 527-2:2012 – Tworzywa sztuczne – Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu – Część 2: Warunki badań tworzyw sztucznych przeznaczonych do różnych technik formowania.
- [5] Taşdemirci A., Ergönenç Ç., Güden M. "Split Hopkinson pressure bar multiple reloading and modeling of a 316 L stainless steel metallic hollow sphere structure". *International Journal of Impact Engineering*. 37 (2010): 250–259. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2009.06.010>.