

Badania wytrzymałościowe struktur komórkowych wytworzonych przyrostowo z metal filament BASF Ultrafuse 316L

Paweł Płatek¹, Kamil Cieplak¹, Marcin Sarzyński¹, Jacek Janiszewski¹, Janusz Kluczyński², Paweł Baranowski², Jerzy Małachowski²

¹Wydział Mechatroniki Uzbrojenia i Lotnictwa, Wojskowa Akademia Techniczna

²Wydział Inżynierii Mechanicznej, Wojskowa Akademia Techniczna

email: pplatek@wat.edu.pl, kamil.cieplak@wat.edu.pl, marcin.sarzyński@wat.edu.pl, jacek.janiszewski@wat.edu.pl, janusz.kluczyński@wat.edu.pl, pawel.baranowski@wat.edu.pl, jerzy.malachowski@wat.edu.pl

STRESZCZENIE: W pracy przedstawiono wyniki badań wytrzymałościowych struktur komórkowych wykonanych ze stali 316L stosując technikę wytwarzania przyrostowego Fused Filament Fabrication (FFF) oraz tzw. metal filament stanowiący kompozyt polimerowo-metaliczny. Do realizacji zadania użyto drukarki 3D – Prusa i3 MK3S oraz filamentu BASF Ultrafuse 316L. W celu uzyskania pożądanych właściwości mechanicznych struktur niezbędne było wykonanie dodatkowego procesu cieplno-chemicznego polegającego na debinderyzacji i spiekaniu katalitycznym. Określone na podstawie testów wytrzymałościowych właściwości mechaniczne otrzymanego materiału były zbliżone do uzyskiwanych z zastosowaniem technik wytwórczych takich, jak: SLM – Selective Laser Melting oraz LENS – Laser Engineered Net Shaping. Wytworzone struktury poddano testom ściskania w warunkach obciążenia quasi-statycznego oraz dynamicznego. Ponadto, przeanalizowano przebieg procesu ich deformacji z użyciem podejścia numerycznego bazującego na zastosowaniu Metody Elementów Skończonych. Na podstawie uzyskanych wyników badań technologicznych stwierdzono, że zaproponowana technika druku 3D w połączeniu z dodatkową obróbką cieplną stanowi dobrą alternatywę wytwarzania obiektów ze stali nierdzewnej bez konieczności stosowania zaawansowanych urządzeń do wytwarzania przyrostowego, działanie których bazuje na technice PBF (Powder Bed Fusion), czy też DED (Direct Energy Deposition). Na podstawie otrzymanych krzywych ściskania zaobserwowano długi zakres uzyskanego plateau (wynikający z plastycznego płynięcia materiału) bez gwałtownych zmian wartości siły ściskania, co wskazuje na wysoką zdolność proponowanych struktur komórkowych do pochłaniania energii mechanicznej.

SŁOWA KLUCZOWE: technologie addytywne, Additive Manufacturing, Fused Filament Fabrication, BASF Ultrafuse 316L, materiały komórkowe

1. Wprowadzenie

Technologie przyrostowe są obecnie najintensywniej rozwijaną grupą technik produkcyjnych na świecie, głównie ze względu na możliwość wytwarzania obiektów o skomplikowanej geometrii i unikalnych właściwościach mechanicznych. Rozwój technik wytwarzania przyrostowego jest ściśle związany z postępem w dziedzinie stosowanych urządzeń jak również wdrażanych na rynek nowych rodzajów materiałów o pożądanych właściwościach mechanicznych [1]. Technika FFF – Fused Filament Fabrication stanowi jedną z najbardziej rozpowszechnionych technik tzw. druku 3D [2]. Bogata oferta dostępnych na rynku urządzeń, prostota procesu wytwarzania, jak również szerokie spektrum dostępnych materiałów głównie na bazie polimerów, czyni ją niezwykle atrakcyjną zarówno w zastosowaniu przemysłowym jak i w bioinżynierii, medycynie, sztuce, a nawet w budownictwie. Analizując trendy rozwojowe w zakresie nowych materiałów konstrukcyjnych dedykowanych dla techniki FFF można zauważyć interesującą propozycję w postaci tzw. metal filamentów. Materiały tego rodzaju są kompozytami o dużym udziale fazy metalicznej (ok. 80% udziału masowego) w postaci proszku metalicznego w osnowie

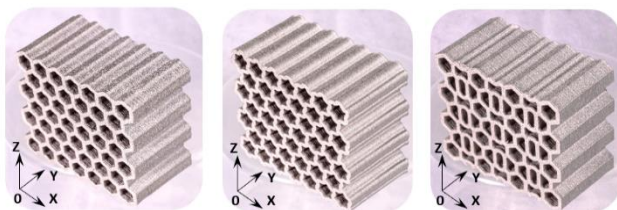
polimerowej. Obecnie dostępnych jest na rynku kilka rodzajów tzw. metal filamentów, które różnią się zastosowanym gatunkiem proszku metalicznego. Cechą charakterystyczną materiałów tego rodzaju jest sposób ich wykorzystania. Oprócz typowego procesu druku 3D polegającego na wytworzeniu tzw. *green part*, konieczne jest przeprowadzenie procesu debinderyzacji oraz spiekania katalitycznego. Proces debinderyzacji ma na celu wypalenie i wypłukanie produktów spalania osnowy polimerowej, zaś proces spiekania zapewnia przetopienie granic ziarnowych proszku metalicznego i otrzymanie obiektu charakteryzującego się wysoką wytrzymałością mechaniczną. Zastosowanie materiałów metal filament umożliwia wytwarzanie za pomocą desktopowych drukarek 3D obiektów wykonanych z różnych gatunków stali (obecnie komercyjnie dostępne są stale nierdzewne 316 L oraz 17-4PH). Pomimo konieczności zastosowania dodatkowej obróbki cieplnej proponowane rozwiązanie wydaje się atrakcyjną propozycją w porównaniu do zaawansowanych technik wytwarzania (PBF/DED).

Celem niniejszej pracy jest numeryczno-eksperymentalna ocena mechanicznego zachowania się regularnych struktur komórkowych wytworzonych za pomocą techniki druku 3D z filamentu BASF Ultrafuse

316 L w warunkach quasi-statycznego obciążenia ściskającego.

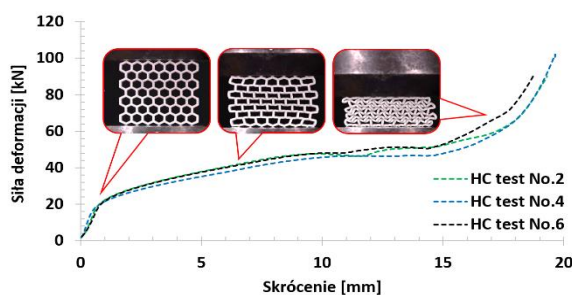
2. Badania eksperymentalne struktur komórkowych wytworzonych z metal filament

Dzięki zastosowaniu drukarki 3D Prusa i3 MK3S możliwe było wytworzenie trzech wariantów struktur komórkowych (rys. 1). Bazą do ich opracowania była dobrze znana i scharakteryzowana w literaturze topologia tzw. plastra miodu [3]. Wytworzone struktury w formie „green parts” zostały przesłane do niemieckiej firmy Elnik Systems GmbH, gdzie zrealizowano usługę procesu debinderyzacji i spiekania zgodnie z zalecanymi wymaganiami technologicznymi. Wymiary uzyskanych struktur wyniosły w przybliżeniu 32 x 36 x 20 mm.



Rys. 1. Widok ogólny trzech wariantów struktur komórkowych wytworzonych za pomocą techniki FFF z metal filament

Wytworzone struktury poddano testom ściskania w warunkach obciążenia quasi-statycznego. Badania te zrealizowano z użyciem uniwersalnej maszyny wytrzymałościowej MTS Criterion C45.105. Prędkość trawersy podczas ściskania przyjęta w trakcie testów wyniosła 0,001 m/s. Do rejestracji przebiegu prób wykorzystano aparat cyfrowy Canon EOS R. Dzięki wysokiej rozdzielczości oraz zastosowaniu obiektywu makro o ogniskowej 200 mm wraz z pierścieniami dystansowymi, uzyskano nagrania umożliwiające dokładną analizę przebiegu procesu deformacji. Przykładowy przebieg krzywej opracowany na podstawie uzyskanych danych doświadczalnych dla struktury o topologii plastra miodu przedstawiono na rys. 2.

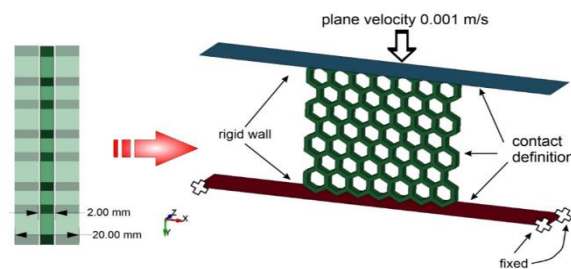


Rys. 2. Wyniki testów ściskania struktury o topologii plastra miodu w warunkach obciążania quasi-statycznego

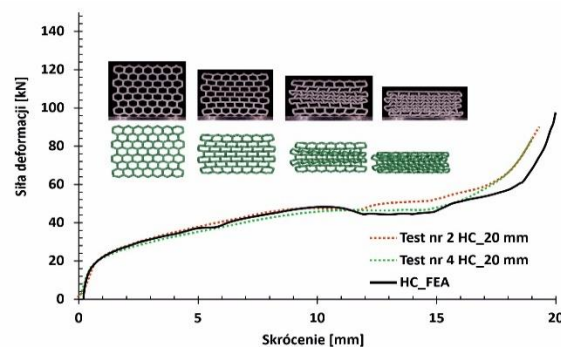
3. Badania numeryczne struktur komórkowych wytworzonych z metal filament

Na podstawie uzyskanych wyników badań eksperymentalnych sformułowano założenia do opracowania modeli numerycznych pozwalających w szerszym zakresie przeanalizować wpływ zmiany

topologii struktury na jej zdolność do pochłaniania energii mechanicznej. Do odwzorowania geometrii poszczególnych wariantów struktur wykorzystano heksagonalne elementy skończone. Badania symulacyjne zrealizowano w środowisku programu obliczeniowego Ls-Dyna. Przyjęte w trakcie badań warunki początkowo-brzegowe odwzorowywały warunki prowadzonych badań eksperymentalnych. Do opisu właściwości mechanicznych materiału stali nierdzewnej 316L wykorzystano sprężysto plastyczny model. Na rysunku 3 przedstawiono widok ogólny modelu numerycznego wraz z przyjętymi warunkami początkowo-brzegowymi. Z kolei na rys. 4 przedstawiono porównanie uzyskanych wyników symulacji komputerowej z danymi eksperymentalnymi określonymi dla struktury o topologii plastra miodu w warunkach obciążenia quasi-statycznego. Zgodność uzyskanych wyników świadczy o prawidłowo przyjętych warunkach początkowo-brzegowych w trakcie badań symulacyjnych i pozwala na podjęcie dalszych badań celem określenia optymalnych parametrów geometrycznych dla rozpatrywanej struktury komórkowej, która wytworzona z ww. materiału charakteryzować się będzie wysoką zdolnością do pochłaniania energii mechanicznej.



Rys. 3. Definicja warunków początkowo-brzegowych przyjętych podczas symulacji komputerowych



Rys. 4. Porównanie wyników badań symulacyjnych z danymi eksperymentalnymi

Literatura

- [1] Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, pplications and challenges. *Composites Part B*, 143, 2017, 172-196.
- [2] Singh, S., Singh, G., Prakash, C., & Ramakrishna, S. (2020). Current status and future directions of fused filament fabrication. *Journal of Manufacturing Processes*, 55(January), 288-306.
- [3] Baranowski, P., Płatek, P., Antolak-Dudka, A., Sarzyński, M., Kucewicz, M., Durejko, T., Małachowski, J., Janiszewski, J., & Czujko, T. (2019). Deformation of honeycomb cellular structures manufactured with Laser Engineered Net Shaping (LENS) technology under quasi-static loading: Experimental testing and simulation. *Additive Manufacturing*, 25(November), 307-316.