



## Problematyka projektowania i badania regularnych struktur komórkowych wytwarzanych technologiami przyrostowymi

Jacek JANISZEWSKI\*, Paweł PŁATEK, Piotr DZIEWIT,  
Katarzyna SARZYŃSKA

*Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechatroniki i Lotnictwa,  
Instytut Techniki Uzbrojenia  
ul. gen. Witolda Urbanowicza 2, 00-908 Warszawa  
\*autor korespondencyjny: jacek.janiszewski@wat.edu.pl*

*Artykuł wpłynął do redakcji 10.04.2018 r.*

*Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano 22.08.2018 r.*

DOI 10.5604/01.3001.0012.2738

**Streszczenie.** Celem niniejszej pracy jest przedstawienie wybranych aspektów związanych z projektowaniem i badaniem energochłonnych regularnych struktur komórkowych typu 2D wykonanych za pomocą addytywnych technik wytwarzania. Zaproponowana przez autorów metoda badawcza obejmowała wytwarzanie struktur za pomocą dwóch technik druku 3D zróżnicowanych pod względem technologicznym i możliwości wytwórczych. Metoda FDM (ang. *Fused Deposition Modelling*) pozwoliła na przeanalizowanie procesu deformacji szerokiego spektrum topologii w zakresie obciążenia quasi-statycznego i udarowego. Z kolei metoda LENS (ang. *Laser Engineered Net Shaping*) umożliwiła wykonanie struktur ze stopu tytanu Ti6Al4V charakteryzującego się wysoką wytrzymałością mechaniczną.

W pracy przedstawiono najważniejsze problemy związane z procesem badania regularnych struktur komórkowych w różnych warunkach obciążenia, w szczególności w warunkach dynamicznego odkształcenia z wykorzystaniem techniki dzielonego pręta Hopkinsona (SHPB). Przedstawiono główne zagadnienia związane z budową stanowiska SHPB oraz opisano specyfikę badania struktur komórkowych w klasycznym układzie prętów Hopkinsona i w układzie tzw. bezpośredniego uderzenia. Ponadto, dokonano obszernego omówienia problematyki modelowania numerycznego deformacji struktur komórkowych, ze szczególnym uwzględnieniem definicji założeń koniecznych do poprawnego ich zamodelowania.

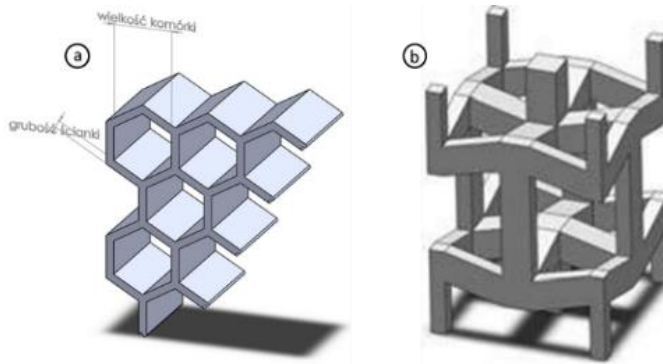
**Słowa kluczowe:** materiały komórkowe, energochłonność, druk 3D, modelowanie numeryczne, technika dzielonego pręta Hopkinsona

## 1. WPROWADZENIE

Poszukiwanie optymalnych rozwiązań konstrukcyjnych w procesie projektowania i wytwarzania nowych produktów konsumenckich wymusza potrzebę prowadzenia prac badawczych w zakresie inżynierii materiałowej celem opracowania nowych, wysoce wytrzymałych materiałów konstrukcyjnych charakteryzujących się niską gęstością oraz takimi cechami jak: zdolność do izolacji termicznej, akustycznej, czy wibracyjnej [1-4]. Stopniowe osiągnięcie kresu możliwości w zakresie kształtowania ww. cech materiałów litych przyczyniło się do powstania nowego trendu rozwojowego ukierunkowanego na poszukiwanie nowych rozwiązań w postaci materiałów o strukturze komórkowej [4-6]. Ogólna klasyfikacja materiałów tego typu zakłada ich podział na materiały komórkowe stochastyczne i regularne [7]. Materiały stochastyczne, produkowane w wyniku spieniania różnego rodzaju polimerów i metali charakteryzują się anizotropowym rozkładem właściwości mechanicznych, przez co zakres ich zastosowania jest dość mocno ograniczony [7]. Najczęściej są one stosowane w przemyśle motoryzacyjnym, lotniczym, jak również w elementach infrastruktury drogowej jako dodatkowe wypełnienie paneli energochłonnych.

Drugą grupę materiałów o budowie komórkowej stanowią regularne materiały komórkowe [5-7]. W przeciwieństwie do materiałów stochastycznych cechują się one powtarzalną budową struktury określoną za pomocą elementarnej komórki. Wyróżnia się dwu i trójwymiarowe, regularne struktury komórkowe (rys. 1). Ich charakterystyczną cechą jest izo- lub ortotropowość właściwości mechanicznych, które mogą być modelowane już na poziomie projektowania topologii.

Struktury tego typu do niedawna były wytwarzane w wyniku wieloetapowej obróbki plastycznej profili cienkościennych [6, 7]. Jedną z najczęściej stosowanych topologii w ich produkcji była geometria tzw. plastra miodu. Obserwowany od dekady postęp w dziedzinie addytywnych technik wytwarzania w znaczącym stopniu przyczynił się do zintensyfikowania prac badawczych w zakresie regularnych materiałów komórkowych [6-10].



Rys. 1. Przykłady fragmentów regularnych struktur komórkowych: a) dwuwymiarowa struktura plastra miodu, b) trójwymiarowa struktura wklęsłego plastra miodu [7]

Fig. 1. Sample of regular cellular structures fragments: a) 2D honeycomb structure, b) 3D auxetic honeycomb structure [7]

Nowe, wydajne techniki produkcji, możliwość zastosowania w procesie wytwarzania materiałów polimerowych, proszków metalicznych, ceramicznych oraz żywic światłoutwardzalnych pozwoliły na podjęcie prób w zakresie opracowania nowych topologii i określenie ich wpływu na właściwości mechaniczne struktury [10]. Na podstawie wyników wielu prac badawczych można stwierdzić, że materiały tego typu charakteryzują się możliwością programowania ich właściwości mechanicznych [11, 12]. Ponadto, w zależności od przyjętej topologii komórki elementarnej istnieje możliwość kontrolowania przebiegu procesu deformacji materiału o budowie komórkowej, celem uzyskania jak najwyższego wskaźnika energochłonności struktury. Wymieniona cecha czyni regularne materiały komórkowe szczególnie atrakcyjnymi dla takich dziedzin przemysłu jak: motoryzacyjny, lotniczy i transportowy. Ponadto, mogą one znaleźć zastosowanie w procesie wytwarzania pasywnych systemów ochrony balistycznej, elementów konstrukcyjnych budynków stanowiących tzw. infrastrukturę krytyczną.

Celem nadrzędnym niniejszej publikacji jest przybliżenie problematyki podjętej w projekcie badawczym, realizowanym przez interdyscyplinarny zespół naukowo-badawczy WAT, w skład którego wchodzi pracownicy naukowcy Instytutu Techniki Uzbrojenia (ITU), Katedry Zaawansowanych Materiałów i Technologii (KZMiT) oraz Katedry Mechaniki i Informatyki Stosowanej (KMiIS). Prezentowane niżej zagadnienia w zakresie opracowania, wytwarzania i badania właściwości energochłonnych regularnych struktur komórkowych są efektem prac zespołu badawczego ITU.

Głównym celem (hipotezą badawczą) ww. projektu jest wykazanie, że właściwości wytrzymałościowe oraz zdolności do absorpcji energii regularnych i gradientowych struktur komórkowych wykonanych za pomocą techniki LENS mogą być zbliżone lub wyższe w porównaniu z dotychczas

otrzymywanymi tego typu materiałami za pomocą konwencjonalnych technologii wytwórczych.

Aby sprawdzić powyższą hipotezę określono cele cząstkowe, które przedstawiały się następująco:

- budowa stanowiska dzielonego pręta Hopkinsona (SHPB) o średnicy prętów 40 mm, umożliwiającego wykonywanie testów dynamicznych z użyciem próbek o dużych rozmiarach;
- zaprojektowanie, a następnie wytworzenie metodami przyrostowymi struktur komórkowych o różnych topologiach;
- zweryfikowanie jakości wykonania struktur komórkowych zarówno pod względem geometrycznym, jak i jednorodności;
- wykonanie badań wytrzymałościowych w różnych warunkach odkształcenia;
- optymalizacja numeryczna topologii regularnych struktur komórkowych ze względu na zdolność do pochłaniania energii udaru.

## **2. PROBLEMATYKA PROJEKTOWANIA I WYTWARZANIA REGULARNYCH STRUKTUR KOMÓRKOWYCH**

Właściwości mechaniczne materiałów komórkowych o strukturze regularnej silnie zależą od podstawowych parametrów geometrycznych określających ich topologię (kształt i wymiar komórki elementarnej, grubość jej ścianki, liczba komórek) oraz od gęstości i wytrzymałości materiału użytego do ich wykonania. Prawidłowa ocena energochłonności struktury o budowie komórkowej wymaga przyjęcia istotnych założeń konstrukcyjnych, które dodatkowo są uwarunkowane od zastosowanej techniki druku 3D w procesie jej wykonania.

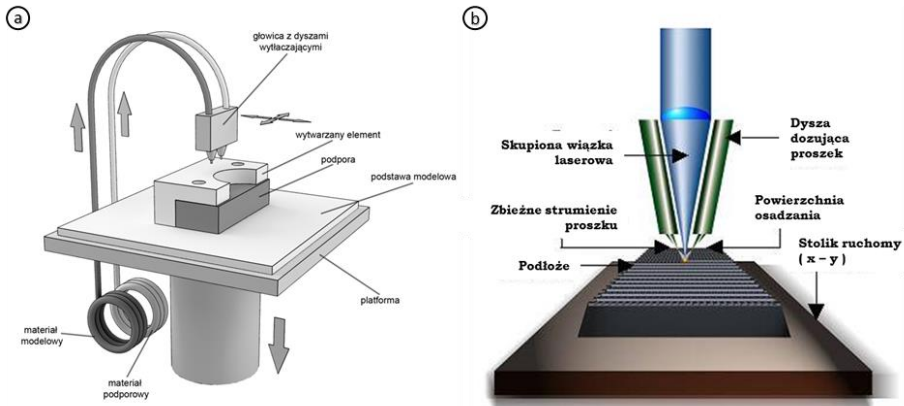
Na podstawie wskazówek zawartych w publikacjach [13, 14] w trakcie projektowania regularnej struktury komórkowej typu 2D o wymiarach  $m \times n$  należy ustalić odpowiednią liczbę komórek definiujących geometrię struktury w taki sposób, aby proces jej deformacji przebiegał w całej płaszczyźnie, a nie tylko w komórkach bezpośrednio znajdujących się w strefie działania warunku obciążenia. Na podstawie danych literaturowych przyjęto, że minimalna liczba komórek definiujących wymiar  $m \times n$  struktury powinna być większa niż  $8 \times 8$ .

Autorzy publikacji w swoich badaniach wykorzystali dwie techniki wytwarzania przyrostowego struktur komórkowych: technikę FDM [15] (ang. *Fused Deposition Modeling*) oraz technikę LENS [15] (ang. *Laser Engineered Net Shaping*). Z uwagi na rodzaj prowadzonych badań eksperymentalnych modele rzeczywiste struktur zostały wykonane w dwóch wariantach konfiguracyjnych. W przypadku metody FDM, wariant pierwszy struktury wykonano w postaci prostopadłościennych bryły o wymiarach  $80 \times 80 \times 20$  mm i grubości ścianki 1 mm. Wariant ten wykorzystano do oceny przebiegu deformacji struktury w warunkach obciążenia quasi-statycznego.

Drugi wariant o wymiarach  $40 \times 40 \times 20$  mm i grubości ścianki  $1 \pm 0,1$  mm wykorzystano do realizacji badań w zakresie obciążenia dynamicznego oraz udarowego. W przypadku techniki LENS modele rzeczywiste struktur wykonano w jednym wariantcie w postaci prostokątnych modeli o wymiarach  $40 \times 40 \times 10$  mm i grubości ścianki komórki  $0,9 \pm 0,05$  mm.

Decyzja o wyborze dwóch rodzajów technik wytwarzania regularnych struktur komórkowych uwarunkowana była następującymi argumentami. Technika FDM, polegająca na nakładaniu przez głowicę drukującą materiału polimerowego na stół roboczy (rys. 2a) charakteryzuje się relatywnie niskim kosztem wytwarzania modeli w porównaniu do techniki LENS [15, 16]. Ponadto, dzięki niej możliwe było przeanalizowanie przebiegu procesu deformacji struktur o różnych rodzajach topologii (od klasycznych typu honeycomb po złożone o właściwościach auksetycznych). Technikę LENS [17] wykorzystano do wykonania modeli struktur z stopu tytanu Ti6Al4V charakteryzujących się wysoką wytrzymałością mechaniczną [18].

Z uwagi na znaczne ograniczenia technologiczne wynikające ze specyfiki wytwarzania LENS polegającej na przetapianiu materiału w postaci proszku sferoidalnego za pomocą skupionej wiązki lasera dużej mocy (rys. 2b) autorzy w swoich wstępnych pracach ograniczyli się do topologii struktur bazujących na geometrii plastra miodu.



Rys. 2. Technologie druku 3D: a) FDM, b) LENS

Fig. 2. 3D printing methods: a) FDM, b) LENS

Charakterystyczną cechą technologii LENS jest możliwość wytworzenia szkieletu elementu o gęstości zbliżonej do gęstości litego materiału (wypełnienie nawet do 99,5%) [19].

Ponadto właściwości wytrzymałościowe obiektów wykonanych technologią LENS są znacznie wyższe w porównaniu z konwencjonalnymi metodami, ze względu na możliwość uzyskania drobnokrystalicznej struktury wynikającej z szybkiego odprowadzania ciepła w trakcie druku 3D. Jednakże technika ta ma swoje ograniczenia wynikające z trudności budowy trójwymiarowych konstrukcji. Ponadto, ze względu na stale dostarczany proszek z dysz w czasie procesu technologicznego, gwałtowne zmiany kierunku budowanego elementu często dochodzi do nadbudowy materiału w obszarach połączenia poszczególnych komórek.

Zjawisko to skutkuje niejednorodnością struktury krystalograficznej, co wpływa na właściwości mechaniczne drukowanego elementu. Kolejnym problemem jest określenie minimalnej grubości, z jaką wykonywana jest pojedyncza warstwa oraz ścianki komórki elementarnej. Ich wymiar jest uwarunkowany od wielkości plamki wiązki lasera skupionej w punkcie [20].

### **3. PROBLEMATYKA MODELOWANIA NUMERYCZNEGO PROCESU DEFORMACJI REGULARNYCH STRUKTUR KOMÓRKOWYCH**

Metoda Elementów Skończonych (MES) [21] jest najczęściej wykorzystywaną metodą modelowania numerycznego stosowaną do oceny procesu deformacji regularnych struktur komórkowych [22-25].

Podstawową jej zaletą jest uniwersalność, która pozwala na analizę przebiegu deformacji szerokiego spektrum przypadków, zróżnicowanych w zakresie topologii struktury (2D, 3D), sposobu i kierunku działania obciążenia, zastosowanego związku konstytutywnego do opisu właściwości mechanicznych materiału. Ponadto, wiele z opublikowanych prac zawiera wyniki badań symulacyjnych MES dotyczących procesu deformacji regularnych struktur komórkowych wykonanych za pomocą addytywnych technik wytwarzania [8, 11, 21, 25]. Formułowane w nich wnioski wskazują na wysoki potencjał naukowy badań symulacyjnych oraz możliwość definiowania i optymalizowania właściwości mechanicznych struktur komórkowych. Prezentowane w nich wyniki badań bardzo często są celowo ograniczane i nie zawierają istotnych informacji dotyczących samego sposobu prowadzenia badań symulacyjnych. Autorzy wielu prac przedstawiają jedynie wynik weryfikacji zastosowanych modeli numerycznych MES polegającej na porównaniu wyników symulacji komputerowych z danymi z badań eksperymentalnych. Brakuje w nich informacji na temat zastosowanego schematu obliczeniowego (*implicite*, *explicite*), sposobu odwzorowania geometrii struktury komórkowej (rodzaju zastosowanych elementów skończonych, wielkości elementów), definicji przyjętych warunków początkowo-brzegowych (rodzaj i sposób obciążenia wymuszającego deformację) [8, 23, 25].

Właściwe odwzorowanie przebiegu procesu deformacji struktur komórkowych wykonanych za pomocą addytywnych technik wytwarzania (druk 3D) z wykorzystaniem różnych metod wytwórczych (FDM, SLS, SLM, LENS) jest zagadnieniem trudnym i wymaga uwzględnienia wielu czynników na etapie przygotowania modeli numerycznych MES.

W niniejszym rozdziale przedstawiono najważniejsze aspekty związane z modelowaniem numerycznym procesu deformacji regularnych struktur komórkowych wykonanych techniką druku 3D za pomocą metody FDM oraz LENS. Niniejsze wnioski zostały sformułowane na podstawie wyników badań własnych uzyskanych przez autorów publikacji.

Poprawny wynik walidacji opracowanego modelu numerycznego stanowi wstęp do dalszych badań symulacyjnych mających na celu optymalizację właściwości mechanicznych struktury z uwzględnieniem jej zastosowania (energochłonność, izolacja akustyczna, termiczna, itp.)

Jedną z powszechnie stosowanych metod walidacji modeli numerycznych MES jest weryfikacja uzyskanych wyników symulacyjnych poprzez ich porównanie z danymi eksperymentalnymi, określonymi w różnych warunkach obciążenia (quasi-statyczne, dynamiczne oraz udarowe). Na rys. 3 przedstawiono za pomocą schematu istotne czynniki mające wpływ na jakość uzyskanych wyników badań numerycznych przebiegu procesu deformacji regularnych struktur komórkowych.

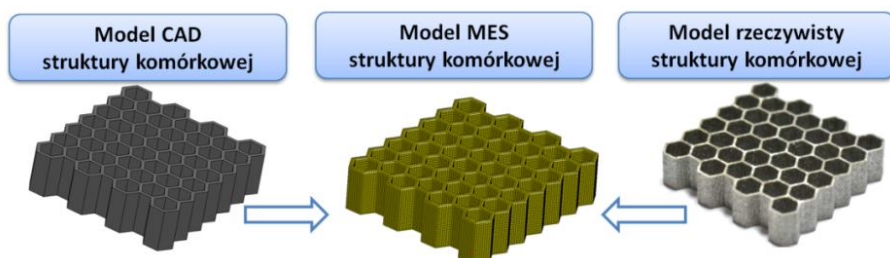


Rys. 3. Schemat ideowy czynników determinujących dokładność odwzorowania procesu deformacji regularnych struktur komórkowych za pomocą metody MES

Fig. 3. Scheme of main factors determining the quality of regular cellular structure deformation process with use the FE method

Warunkiem niezbędnym do poprawnej weryfikacji wyników badań symulacyjnych jest określenie wielkości fizycznej stanowiącej podstawę procesu weryfikacji. Bardzo często weryfikacja jest realizowana poprzez porównanie przebiegu siły wymuszającej proces deformacji lub energii deformacji w funkcji odkształcenia względnego struktury  $F_{def} = f(\Delta\varepsilon), E_{def} = f(\Delta\varepsilon)$  z wynikami badań eksperymentalnych określonych na podstawie wielokrotnych prób zrealizowanych zgodnie z metodyką prowadzenia poszczególnych rodzajów testów (np. jednoosiowa próba ściskania, rozciągania).

Pierwszym z istotnych czynników decydujących o jakości uzyskanych wyników badań numerycznych jest właściwe odwzorowanie modelu geometrycznego struktury za pomocą modelu MES. Na podstawie uzyskanych wyników badań własnych autorzy publikacji stwierdzili konieczność uwzględnienia w modelu numerycznym MES odchyłek wymiarowych grubości ścianki struktury w zależności od zastosowanej techniki wykonania modeli rzeczywistych struktur (rys. 4). Do określenia rzeczywistych wymiarów próbek struktur zaproponowano wykorzystanie tomografii komputerowej oraz skanera 3D działającego na zasadzie projekcji światła strukturalnego.



Rys. 4. Schemat ideowy procesu definiowania modelu MES struktury komórkowej z uwzględnieniem wartości odchyłek wymiarowych modelu rzeczywistego

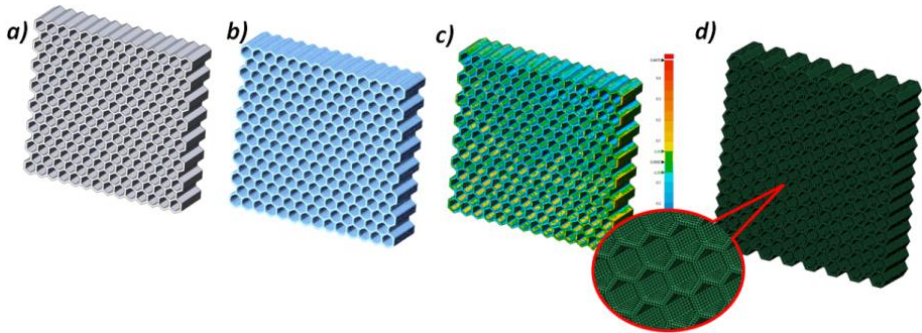
Fig. 4. Scheme of the FE model definition process with consideration of geometrical model dimensional deviations

W przypadku badań symulacyjnych odwzorowujących przebieg procesu deformacji regularnych struktur komórkowych wykonanych w technologii FDM za pomocą maszyny Dimension SST 1200es z materiału ABS, wartość odchyłki wymiarowej ścianki o grubości 1 mm dla pojedynczej komórki wynosiła ok. 0,05-0,1 mm. Ocenę dokładności wykonania modelu zrealizowano za pomocą modelu przestrzennego opracowanego na podstawie rekonstrukcji zdjęć rentgenowskich rzeczywistej próbki struktury (rys. 5).

Modelowanie procesu deformacji struktur komórkowych wykonanych za pomocą techniki LENS wymagało większego nakładu pracy celem zdefiniowania stosownego modelu numerycznego MES.



Przed przystąpieniem do jego budowy konieczne było określenie właściwej wartości grubości ścianki, ponieważ w procesie wytwarzania rzeczywistych struktur zastosowano technikę konturowania. Polegała ona na wytwarzaniu detali na podstawie cienkościennych modeli CAD o grubości 0,001 mm. Przyjęta wartość grubości ścianki komórki elementarnej była uwarunkowana przede wszystkim koniecznością optymalizacji procesu technologicznego oraz ograniczeniami technologicznymi zastosowanego urządzenia MR-7 firmy Optomec.



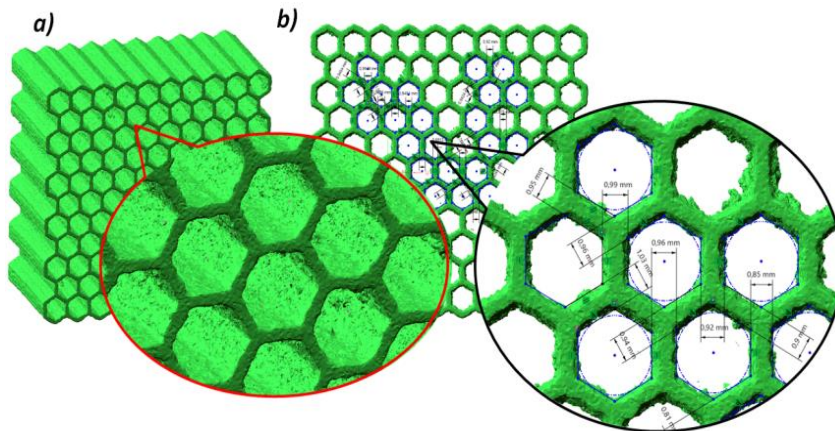
Rys. 5. Schemat ideowy budowy modelu numerycznego MES struktur komórkowych wykonanych techniką FDM a) model CAD, b) model opracowany w wyniku rekonstrukcji zdjęć tomograficznych, c) porównanie modelu CAD z danymi pomiarowymi, d) model MES

Fig. 5. Scheme of regular cellular structure FEA model definition made by FDM technique a) CAD model, b) model defined based on computer tomography image reconstruction, c) comparison of CAD model to measured data d) FE model

Model MES opracowano na podstawie danych uzyskanych z analizy dokładności modelu rzeczywistej struktury. Realizacja niniejszego zadania wymagała rekonstrukcji modelu 3D struktury komórkowej na podstawie zdjęć tomograficznych, a następnie wykonania dokładnych pomiarów w środowisku programu Geomagic Design X (rys. 6).

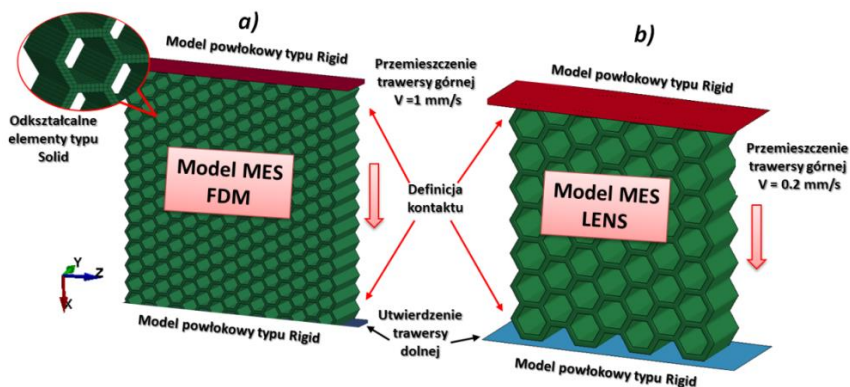
Wykonane wielokrotnie pomiary grubości ścianki pozwoliły stwierdzić, że możliwe jest przyjęcie uśrednionej wartości wynoszącej 0,93 mm, która została w dalszej kolejności przyjęta w procesie budowy modelu numerycznego MES.

Kolejnym czynnikiem determinującym jakość wyników symulacji komputerowych odwzorowujących proces deformacji regularnych struktur komórkowych stanowi definicja warunków początkowo-brzegowych. Jako punkt odniesienia do oceny poprawności zaproponowanych modeli numerycznych wykorzystano test jednoosiowego ściskania rzeczywistych struktur w warunkach obciążenia quasi-statycznego.



Rys. 6. Analiza właściwości geometrycznych próbki struktury komórkowej wykonanej technika LENS a) widok ogólny modelu na podstawie rekonstrukcji zdjęć tomograficznych, b) pomiar grubości ścianki na potrzeby budowy modelu MES

Fig. 6. Analysis of geometrical properties of regular cellular specimen made using the LENS manufacturing technique a) main view of model developed based on computer tomography image reconstruction b) measurement of wall thickness required to define the FE model



Rys. 7. Widok ogólny modeli numerycznych MES zastosowanych w badaniach symulacyjnych procesu deformacji struktur komórkowych: a) wykonanych techniką FDM, b) wykonanych techniką LENS

Fig. 7. Main view of FE models applied in numerical investigations of regular cellular structure deformation process: a) made by the FDM technique, b) made using the LENS technique

Badania symulacyjne zrealizowano w środowisku programu LS-Dyna wykorzystując zarówno jawny (*implicite*) jak i dyskretny (*explicite*) schemat całkowania równań MES [21]. Przyjęta definicja warunków początkowo-brzegowych dla obydwu analizowanych przypadków była podobna (rys. 7).

Model struktury odwzorowano za pomocą odkształcalnych elementów bryłowych typu hexagonalnego [21]. Powierzchnię wymuszającą proces deformacji i odwzorowującą sposób zamocowania struktury w trakcie testów opisano za pomocą elementów powłokowych typu Rigid (nieodkształcalnych). W obydwu przypadkach powierzchnie dolne były utwierdzone, górne przemieszczały się ze stałą prędkością wynoszącą w przypadku symulacji odwzorowujących proces deformacji struktur wykonanych techniką FDM,  $V = 1 \frac{m}{s}$ , w przypadku struktur wykonanych techniką LENS –  $V = 0,2 \frac{m}{s}$ .

Wzajemne oddziaływanie pomiędzy materiałem struktury, a powierzchniami typu Rigid określono za pomocą definicji kontaktu bazującej na funkcji kary. Pozwoliła ona na uwzględnienie w procesie deformacji struktury dyssypacji energii w wyniku procesu tarcia [21]. Podstawową zaletą zastosowanego schematu typu *implicite* jest możliwość zdefiniowania wartości kroku czasowego, z jakim będzie realizowana procedura całkowania numerycznego. Dla wariantu obliczeniowego zakładającego deformację struktury komórkowej wykonanej techniką FDM wartość kroku całkowania wyniosła  $\Delta t = 0,005$  s. Dzięki temu możliwe było odwzorowanie quasi-statycznego charakteru procesu deformacji struktury spowodowanej przemieszczeniem górnej powierzchni odwzorowującej trawersę maszyny wytrzymałościowej. Dla przypadku deformacji struktury przedstawionej na rys. 5, a końcowy czas trwania symulacji wyniósł  $t_k = 50$  s. Zastosowany schemat całkowania typu *implicite* wymagał przyjęcia stosowej definicji kontaktu.

Dla rozważanego wariantu obliczeniowego zastosowano kontakty typu AUTOMATIC SINGLE SURFACE TO SURFACE MORTAR oraz AUTOMATIC SINGLE SURFACE MORTAR [21] w celu określenia definicji kontaktu pomiędzy poszczególnymi komórkami struktury.

Podstawowym ograniczeniem zaproponowanego wariantu obliczeniowego był brak możliwości zdefiniowania mechanizmu zniszczenia materiału struktury komórkowej, co w efekcie uniemożliwiło dokładne odwzorowanie przebiegu procesu deformacji.

W drugim wariantcie prowadzonych obliczeń symulacyjnych wykorzystano jawny schemat całkowania typu *explicite*. Dla analizowanego przypadku definicje kontaktu pomiędzy strukturą, a nieodkształcalnymi powłokami określono za pomocą kontaktów typu AUTOMATIC SINGLE SURFACE TO SURFACE oraz AUTOMATIC SINGLE SURFACE [21]. Niniejszy wariant obliczeniowy pozwolił na uwzględnienie w prowadzonych badaniach symulacyjnych mechanizmu zniszczenia materiału.

Dzięki temu przebieg procesu deformacji był zbliżony do wyników określonych na podstawie badań eksperymentalnych. Podstawowym ograniczeniem jawnego schematu całkowania jest wielkość kroku całkowania  $\Delta t$ , która dla niniejszego wariantu obliczeniowego przyjmuje bardzo małe wartości  $\Delta t = 1e^{-8}$  s. Przyjęcie takiej wartości skutkuje długotrwałym czasem realizacji obliczeń numerycznych sięgającym nawet kilku tysięcy godzin.

W związku z powyższym zastosowano definicję wymuszania określoną za pomocą prędkości górnej powierzchni typu Rigid zgodnej z wzorem zawartym w literaturze [26]. Zaproponowane rozwiązanie powoduje zminimalizowanie wartości energii kinetycznej w układzie, w związku z powyższym przebieg procesu deformacji struktury komórkowej był zbliżony do warunków obciążenia quasi-statycznego [27]. Przyjęta definicja prędkości trawersy górnej dla niniejszego wariantu obliczeniowego była określona za pomocą zależności:

$$v(t) = \frac{\pi}{\pi - 2} \frac{d_{max}}{T} \left( 1 - \cos \left[ \frac{\pi}{2T} \cdot t \right] \right) \quad (1)$$

gdzie:  $T$  – oznacza całkowity czas trwania analizy,  $d_{max}$  – maksymalne przemieszczenie trawersy wymuszającej. Wielkość  $T$  oraz  $d_{max}$  określono na podstawie wyników badań eksperymentalnych.

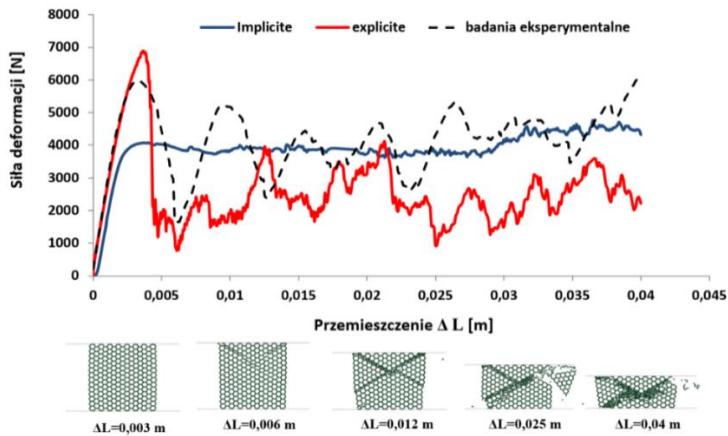
Scałkowanie równania (1) w przedziale od  $t = 0$  do  $t = T$  pozwoliło określić maksymalne przemieszczenie trawersy w chwili czasu  $T$ .

Na rys. 8 przedstawiono przykładowe wyniki przebiegu deformacji regularnej struktury komórkowej o topologii plastra miodu uzyskane z zastosowaniem procedury całkowania równań MES za pomocą schematu typu *implicit* oraz *explicit*.

Porównując wyniki symulacyjne z danymi eksperymentalnymi uzyskanymi dla struktury wykonanej za pomocą techniki FDM można zauważyć, że zastosowanie schematu *explicit* uwzględniającego erozję elementów skończonych pozwoliło na dokładniejsze odwzorowanie przebiegu procesu deformacji.

Kolejnym, trzecim czynnikiem determinującym dokładność odwzorowania przebiegu procesu deformacji struktur komórkowych z wykorzystaniem metody modelowania numerycznego jest opis związku konstytutywnego, określającego właściwości mechaniczne materiału struktury.

W przypadku badań symulacyjnych dotyczących struktur wykonanych za pomocą techniki FDM autorzy pracy wykorzystali model materiałowy typu PLASTIC KINEMATIC [21]. Parametry materiału określono na podstawie przeprowadzonych dodatkowych badań eksperymentalnych w postaci testów jednoosiowego rozciągania oraz ściskania.



Rys. 8. Przykładowe wyniki badań symulacyjnych określonych dla struktury typu honeycomb z zastosowaniem jawnego oraz dyskretnego schematu całkowania

Fig. 8. Exemplary results of numerical investigations obtained for honeycomb structures with application of *implicite* and *explicite* schemes of integration

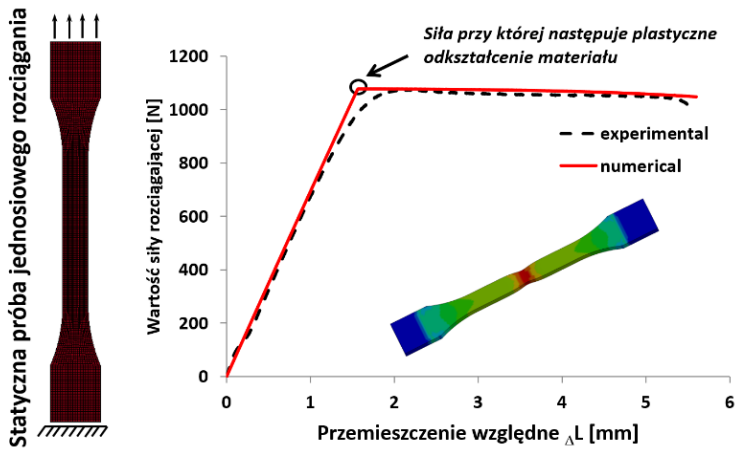
Tab.1. Dane materiałowe dla ABS-plus określone dla modelu Plastic Kinematic

Table1. ABSplus material properties defined to Plastic Kinematic material model

Gęstość [ $\text{kg/m}^3$ ]	971
Moduł Younga [Pa]	$2,1 \cdot 10^9$
Współczynnik Poissona	0,35
Granica plastyczności [Pa]	$30 \cdot 10^6$
Styczny moduł sprężystości [Pa]	$22 \cdot 10^6$
Współczynnik umocnienia	0
Współczynnik szybkości odkształcenia	0
Odształcenia definiujące erozję elementów skończonych	6%

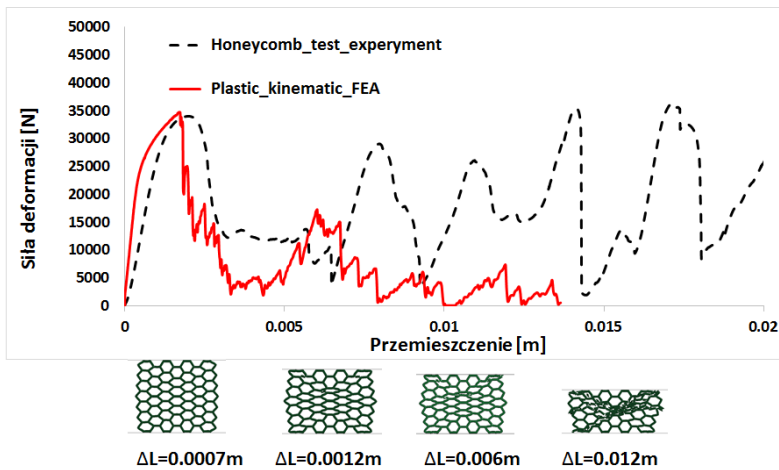
Dane eksperymentalne uzyskane i zweryfikowane za pomocą dodatkowych symulacji komputerowych dla materiału ABS-plus przedstawiono w postaci tabelarycznej (tab. 1) oraz graficznej (rys. 9).

Wykonane dodatkowe badania symulacyjne pozwoliły stwierdzić, że przyjęta definicja modelu materiałowego oraz określone parametry odwzorowane zostały w sposób prawidłowy.



Rys. 9. Wynik weryfikacji związku konstytutywnego Plastic Kinematic dla materiału ABS-plus

Fig. 9. Result of Plastic Kinematic material model verification applied to define the ABS-plus material



Rys. 10. Przykładowe wyniki badań symulacyjnych określonych dla struktury typu honeycomb wykonanej za pomocą techniki LENS z stopu tytanu Ti6Al4V

Fig. 10. Exemplary results of numerical investigations obtained for honeycomb structure made from Ti6Al4V titanium alloy using LENS system

Próba odwzorowania procesu deformacji regularnej struktury komórkowej o topologii plastra miodu wykonanej techniką LENS ze stopu Ti6Al4V z wykorzystaniem związku konstytutywnego PLASTIC KINEMATIC nie pozwoliła na uzyskanie satysfakcjonującej dokładności rozwiązania numerycznego. Przedstawione na wykresie (rys. 10) krzywe zmiany siły deformacji w funkcji przemieszczenia (numeryczna i eksperymentalna) różni się od siebie w sposób znaczący z uwagi na przyjęty w modelu numerycznym mechanizm zniszczenia struktury.

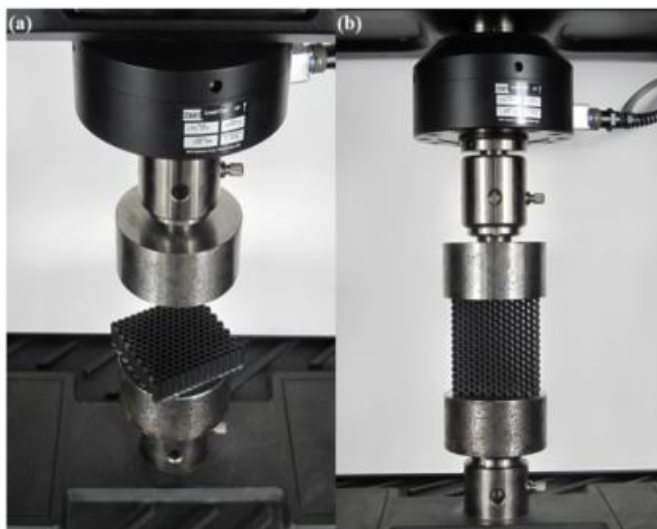
W zaproponowanym wstępnie modelu materiałowym PLASTIC KINEMATIC mechanizm pęknięcia struktury był inicjowany za pomocą erozji (usuwania) elementów skończonych po przekroczeniu określonej wartości odkształceń ( $\epsilon_{\text{failure}}$ ). W trakcie rzeczywistego odkształcania struktury mechanizm jej zniszczenia jest bardziej złożony i uwarunkowany powstawaniem mikropęknięć w materiale na skutek zginania i ścinania materiału. W związku z powyższym do właściwego odwzorowania przebiegu procesu deformacji konieczne jest wykorzystanie związku konstytutywnego uwzględniającego kryterium zniszczenia [28-30]. Niestety, badania symulacyjne tego typu należy poprzedzić dodatkowymi testami eksperymentalnymi, dzięki którym możliwe będzie określenie wartości poszczególnych parametrów modelu zniszczenia.

#### **4. PROBLEMATYKA BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH PROCESU DEFORMACJI REGULARNYCH STRUKTUR KOMÓRKOWYCH**

Ocena reakcji mechanicznej struktury komórkowej na obciążenie jest kluczowa dla zrozumienia mechanizmów odpowiedzialnych za przebieg procesu deformacji danej struktury. Podobnie jak w przypadku materiałów litych, do tego celu wykorzystuje się całą gamę technik badawczych zarówno z zakresu małych szybkości odkształcenia  $\dot{\epsilon} = 0,001 \div 1 \text{ s}^{-1}$  (np. statyczna próba ściskania lub rozciągania), średnich  $\dot{\epsilon} = 10^0 \div 10^2 \text{ s}^{-1}$  (np. udarowa próba ściskania – młot spadowy), jak i dużych szybkości odkształcenia  $\dot{\epsilon} = 10^2 \div 10^3 \text{ s}^{-1}$  (np. test Taylora).

Zazwyczaj struktury komórkowe badane są w warunkach ściskania, rzadziej rozciągania i ścinania. W ogólności, badanie właściwości mechanicznych struktur komórkowych odbywa się w podobny sposób, jak badanie materiałów litych. Jednakże, ze względu na odmienną budowę materiałów komórkowych, testy wytrzymałościowe cechują się pewną specyfiką. Wynika ona głównie z konieczności stosowania próbek materiałów komórkowych o odpowiedniej wielkości. W kilku publikacjach wykazano, że efekt wielkości próbki można pominąć, gdy liczba komórek elementarnych materiału komórkowego jest większa od 7 w danym przekroju próbki [13, 14].





Rys. 11. Widok ustawienia przykładowej struktury pomiędzy uchwytami maszyny wytrzymałościowej w zależności od przyjętego kierunku obciążenia: (a) – obciążenie na kierunku prostopadłym (osiowym) do profilu struktury; (b) – obciążenie na kierunku stycznym do profilu struktury

Fig. 11. The view of the exemplary structure setting between the grips of the strength machine: (a) – loading in the perpendicular (axial) direction to the profile of the structure; (b) – loading in the tangential direction to the structure profile

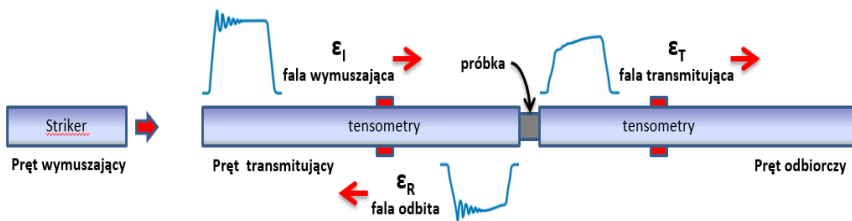
W przypadku badań materiałów komórkowych o dużej wielkości komórki elementarnej (rzędu kilku milimetrów) wymiary gabarytowe próbki mogą być na tyle duże, że badanie ich staje się stosunkowo dużym wyzwaniem technicznym.

O ile przeprowadzenie testów próbek wielkogabarytowych w warunkach quasi-statycznego obciążenia nie sprawia dużych trudności (wyjątek stanowią tu testy na rozciąganie) (rys. 11), o tyle duże problemy techniczne i metodyczne mogą wystąpić podczas realizacji badań w warunkach deformacji zachodzącej z dużymi szybkościami odkształcenia.

Jedną z najczęściej stosowanych technik badania struktur komórkowych w warunkach udarowego obciążenia jest technika dzielonego pręta Hopkinsona (ang. *Split Hopkinson Pressure Bar – SHPB*) [31]. Gwarantuje ona wyznaczenie krzywej ściskania dla danego materiału komórkowego, który został poddany deformacji plastycznej z szybkościami odkształcenia powyżej  $10^2 \text{ s}^{-1}$ .

Typowy układ badawczy składa się z dwóch długich prętów – transmitującego i odbiorczego – między którym znajduje się badany materiał (rys. 12).





Rys. 12. Schemat stanowiska badawczego dzielonego pręta Hopkinsona

Fig. 12. Scheme of system for the SHPB testing

Ponadto, stanowisko SHPB wyposażone jest w układ przyspieszający pręt wymuszający (striker) do prędkości kilkudziesięciu metrów na sekundę oraz tensometryczny system pomiarowy. Przebieg testu przebiega w sposób następujący: w chwili kiedy pręt wymuszający zderzy się z transmitującym generuje się fala wymuszająca  $\varepsilon_I$ , która propaguje w kierunku czoła pręta transmitującego, będącego w kontakcie z próbką. Z chwilą dotarcia fali do powierzchni czołowej wywołuje ona jej ruch i jednocześnie deformację plastyczną próbki. W trakcie tego procesu, fala wymuszająca  $\varepsilon_I$  dzieli się na falę odbitą  $\varepsilon_R$  i transmitującą  $\varepsilon_T$ , która przechodząc przez odkształcaną próbkę do pręta odbiorczego jest rejestrowana przez układ tensometrów naklejonych na pręcie. W profilu fali odbitej  $\varepsilon_R$  zawarta jest informacja o zmianie wielkości odkształcenia próbki w czasie procesu jej falowego obciążenia, zaś kształt fali transmitującej  $\varepsilon_T$  odzwierciedla zmianę naprężenia plastycznego płynięcia materiału próbki w funkcji czasu.

W wyniku obróbki powyższych danych ( $\varepsilon_R(t)$ ,  $\varepsilon_T(t)$ ), polegającej na wyrugowaniu czasu, wyznacza się tzw. dynamiczną krzywą ściskania/umocnienia  $\sigma(\varepsilon)$ .

Badania dynamiczne materiałów litych są wykonywane na stanowiskach SHPB, których średnice prętów mieszczą się typowo w zakresie od 10 mm do 20 mm. Za pomocą takich układów badawczych możliwe jest badanie materiałów komórkowych o relatywnie małych wymiarach komórki elementarnej (poniżej 2 mm) ze względu na ww. efekt wielkości próbki. W innych przypadkach, jak np. piany aluminiowe, konieczne jest zastosowanie układów SHPB, których pręty mają średnicę nawet 100 mm, a to pociąga za sobą wiele problemów natury technicznej i metodycznej.

Pierwszym wyzwaniem, przed którym staje eksperymentator chcący zbudować stanowisko do udarowego badania materiałów komórkowych, to konieczność zbudowania układu badawczego o znacznych rozmiarach (długości).

Wynika to z dwóch głównych wymagań: po pierwsze – z zapewnienia impulsu (fali) obciążenia o odpowiednio długim czasie trwania, gwarantującym przynajmniej kilkuprocentowe odkształcenie plastyczne próbki, a po drugie

– z konieczności spełnienia podstawowych wymagań konstrukcyjnych i metodycznych techniki SHPB.

Maksymalne odkształcenie próbki jakie można osiągnąć na stanowisku SHPB można wyznaczyć za pomocą następującej zależności:

$$\varepsilon_p = 2\dot{\varepsilon}_{max} \frac{L_w}{C_0} \quad (2)$$

gdzie: za pomocą symbolu  $\dot{\varepsilon}_{max}$  wyrażono maksymalną szybkość odkształcenia ( $V/l_0$ ;  $V$  – prędkość uderzenia pręta wymuszającego,  $l_0$  – długość początkowa próbki),  $L_w$  – długość pręta wymuszającego, zaś  $C_0$  oznacza prędkość rozchodzenia się dźwięku w materiale pręta. Zmienność parametrów  $\dot{\varepsilon}_{max}$  i  $C_0$  jest zazwyczaj ograniczona, dlatego o wielkości odkształcenia decyduje przede wszystkim długość pręta wymuszającego  $L_w$ , która w przypadku testów materiałów komórkowych może osiągnąć ponad 1000 mm.

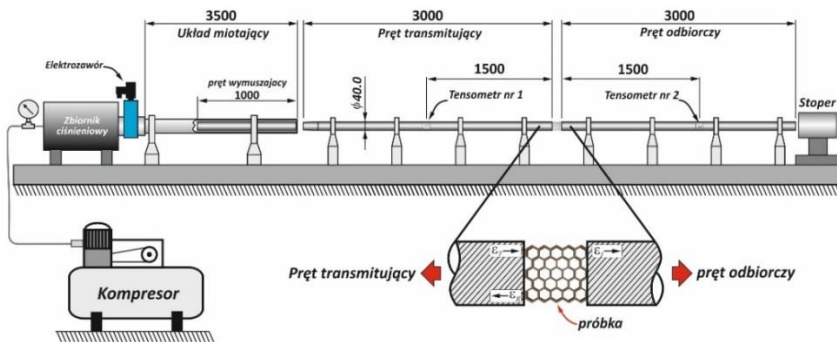
Z kolei, w celu uniknięcia nakładania się fal odbijających się od końców prętów transmitującego i odbiorczego, w miejscu naklejenia tensometrów (zazwyczaj w połowie prętów), długości tych prętów powinny być przynajmniej dwa razy dłuższe od długości pręta wymuszającego.

Ponadto, ze względu na konieczność spełnienia szeregu założeń teoretycznych techniki SHPB (m.in. warunek jednowymiarowej propagacji fali w prętach) zalecane jest, aby iloraz długości pręta transmitującego, a także odbiorczego  $L$  do ich średnicy  $D$  był około 100. Wynika więc, że w przypadku układów SHPB wyposażonych w pręty o dużych średnicach, długość całkowita stanowiska badawczego wraz z długością pneumatycznego układu miotającego może osiągnąć znaczne rozmiary.

W literaturze można znaleźć przykłady układów badawczych SHPB o łącznej długości kilkunastu, a nawet kilkuset metrów [32].

W ramach pracy badawczej prezentowanej w niniejszym artykule zbudowano stanowisko badawcze SHPB o średnicy prętów 40 mm, którego całkowita długość wyniosła 13 000 mm, przy czym układ prętów wraz z układem miotający liczy około 11 000 m (rys. 13). Stanowisko wyposażono w pręty o długości 3 000 mm. Jeden z końców pręta transmitującego (od strony wylotu lufy) został stoczony na długości około 240 mm w celu nadania zbieżności umożliwiającej łagodne przejście ze średnicy 40 mm na 36 mm (średnica pręta wymuszającego). Współosiowość zespołu prętów, jak i lufy układu miotającego została zapewniona poprzez zastosowanie ośmiu opraw z łożyskami liniowymi firmy igus®.

W celu ograniczenia, do kilku centymetrów, ruchu wzdłużnego prętów wywołanego uderzeniem pręta wymuszającego, naprzeciwko powierzchni czołowej pręta odbiorczego zamontowano tzw. stoper, tj. masywną tuleję wypełnioną plasteliną, która przejmuje pęd prętów.



Rys. 13. Schemat Stanowiska dzielonego pręta Hopkinsona

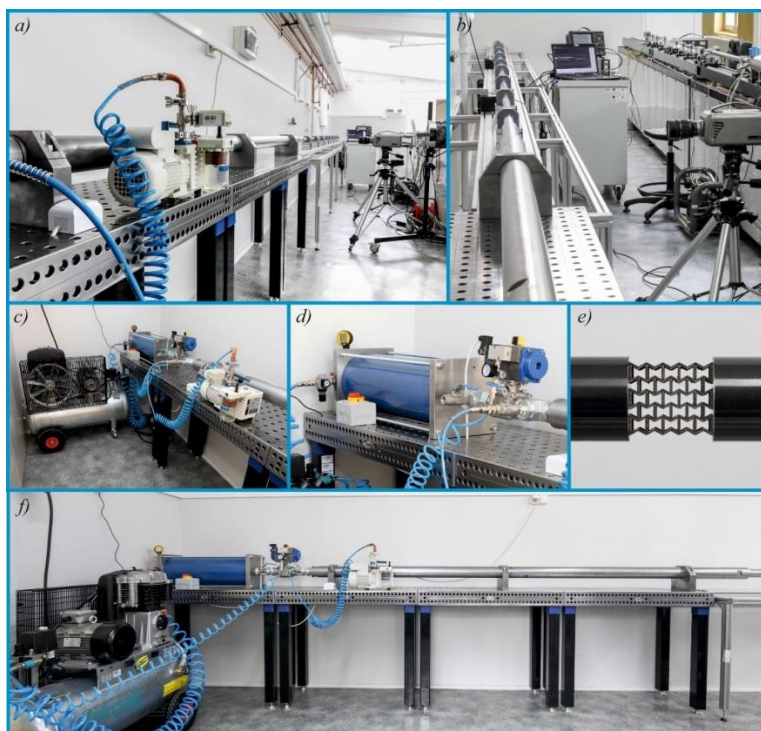
Fig. 13. Scheme of the SHPB apparatus used in investigations

Powyższy układ prętów został zamontowany na podstawie (stole), która została wykonana częściowo z połączenia pięciu montażowych stołów spawalniczych o długości 1 m, a pozostała część, z profili aluminiowych charakteryzujących się dużą sztywnością. Stoły spawalnicze ze względu na dużą nośność zostały przewidziane do montażu pneumatycznego układu miotającego, zaś konstrukcja z profili aluminiowych stanowi podstawę dla układu prętów (rys. 14b).

Układ miotający został tak zaprojektowany, aby umożliwił napędzanie prętów wymuszających do prędkości około 30 m/s i był przystosowany do napędzania prętów wymuszających o długości do 1500 mm.

Główne podzespoły układu miotającego to: prowadnica rurowa (lufa) o długości 3500 mm i średnicy wewnętrznej 38 mm (rys. 14f); zbiornik ciśnieniowy (przystosowany do max. ciśnienia 30 bar) o objętości pięciokrotnie większej od objętości przewodu lufy (rys. 14d), elektrozawór znajdujący się pomiędzy zbiornikiem ciśnieniowym a przewodem lufy. Ponadto, w skład układu miotającego wchodzi sprężarka (rys. 14c) zasilająca zbiornik ciśnieniowy oraz pompa próżniowa do przemieszczania pręta wymuszającego w tylne położenie w przewodzie lufy. Pręt wymuszający o średnicy 36 mm jest centrowany w przewodzie lufy za pomocą kilku tulei wiodących wykonanych z polimeru iglidur® firmy igus®.

Kolejnym wyzwaniem towarzyszącym badaniom struktur komórkowych za pomocą techniki SHPB jest problem małej amplitudy sygnału fali transmitującej  $\varepsilon_T$ . Struktury komórkowe zalicza się do tzw. grupy materiałów o małej impedancji mechanicznej (ang. *low mechanical impedance materials*) [33]. Do tej grupy należą m.in. tworzywa sztuczne (termoplastyczne i duroplasty), elastomery, drewno itp.



Rys. 14. Stanowisko dzielonego pręta Hopkinsona: a) widok ogólny, b) układ prętów, c) sprężarka i układ zasilania, d) zbiornik ciśnieniowy z elektrozaworem, e) struktura komórkowa zamocowana pomiędzy prętami, f) widok ogólny pneumatycznego układu miotającego

Fig. 14. SHPB testing setup: a) general view, b) bar system, c) compressor and supply system, d) pressure vessel with a solenoid valve, e) cellular structure fixed between bars, f) general view of the air gun system

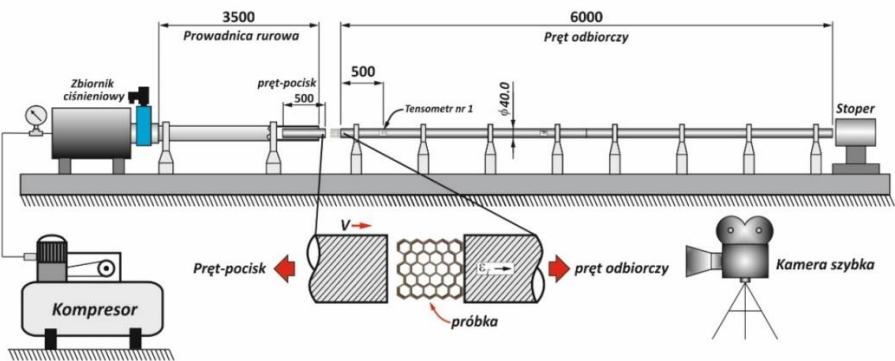
W związku z tym, iż są to materiały o stosunkowo małej wytrzymałości i małej impedancji mechanicznej w stosunku do impedancji prętów, amplituda sygnału fali transmitującej jest zazwyczaj bardzo mała, co skutkuje trudnościami z jej rejestracją za pomocą posiadanego tensometrycznego układu pomiarowego. W takiej sytuacji spotyka się różne podejścia do rozwiązania tego problemu. Pierwsze polega na zrezygnowaniu z tensometrii, jako techniki rejestracji fal w prętach i zastąpieniu jej piezoelektrycznymi czujnikami siły, które są montowane na powierzchniach kontaktowych próbka-pręty [34].

Drugie podejście przewiduje zastosowanie prętów SHPB wykonanych z materiału o małej impedancji mechanicznej, np. plexiglasu lub poliamidu [35-36]. W tym przypadku napotyka się jednak na problem dyspersji fal propagujących się w takich prętach i konieczność stosowania stosunkowo złożonej procedury numerycznej korekcji i rekonstrukcji sygnałów fal rejestrowanych przez tensometryczny układ pomiarowy.

Szerzej tę problematykę omówiono w pracy [37]. Ostatnim i najprostszym sposobem poprawy jakości sygnału transmitującego jest zastąpienie prętów rurami ze stopów lekkich [33].

To podejście wykorzystano podczas opracowywania stanowiska zaprezentowanego na rys. 14 do badania struktur komórkowych wykonanych z tworzywa sztucznego ABS. W tym przypadku, zamiast pręta odbiorczego użyto grubościenniej rury o średnicy zewnętrznej 40 mm i wewnętrznej 20 mm, i o długości 3 000 mm. Rura została wykonana ze stopu aluminium AW 6060 o granicy plastyczności  $R_{0,2}$  równej 150 MPa. Natomiast, do badania struktur komórkowych ze stopu Ti-6Al-4V przewidziano zastosowanie pełnych prętów również wykonanych ze stopu aluminium gatunku AW 6060.

Ostatnią kwestią związaną ze specyfiką testów dynamicznych struktur komórkowych za pomocą techniki SHPB jest zagadnienie badania energochłonności danej struktury. Jak wspomniano wcześniej, w klasycznym układzie dwóch prętów SHPB, struktura komórkowa ulega deformacji co najwyżej rzędu kilkunastu procent. Do określenia zdolności danej struktury do pochłaniania energii uderu konieczne jest osiągnięcie bardzo dużych wielkości odkształcenia, gwarantujących tzw. densyfikację struktury, tj. pełne jej zgniecenie. W tym celu przeprowadza się modyfikację układu badawczego techniki SHPB, która polega na zastosowaniu tylko jednego pręta, tj. pręta odbiorczego, na czole którego jest montowana próbka struktury komórkowej (rys. 15).



Rys. 15. Schemat Stanowiska Hopkinsona w układzie bezpośredniego uderzenia

Fig. 15. Scheme of the direct SHPB system

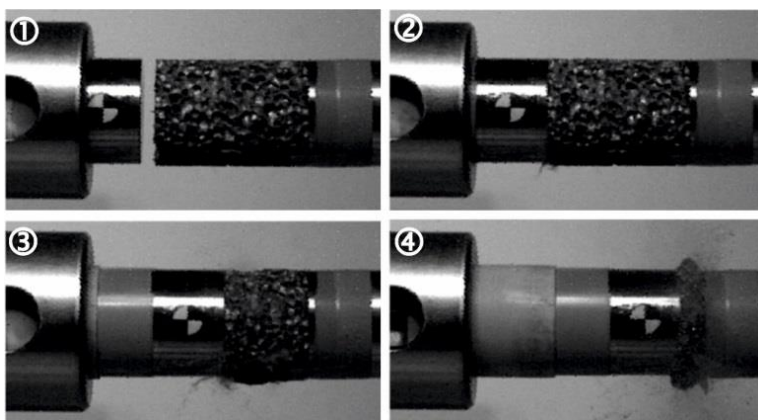
Próbka w tym układzie jest zgniatania w wyniku bezpośredniego uderzenia pręta wymuszającego (pręta-pocisku). Podczas tego procesu rejestrowane są zmiany siły i wielkości deformacji (skrócenia) próbki w czasie. Pomiaru siły zgniatania dokonuje się za pomocą zestawu tensometrów naklejonych na pręt odbiorczy, natomiast pomiar wielkości skrócenia próbki wymaga zastosowania dodatkowego układu pomiarowego.

Do tego celu wykorzystuje się różnego rodzaju bezkontaktowe techniki pomiarowe (np. optoelektroniczne systemy pomiarowe, kamery do rejestracji zjawisk szybkozmiennych itp.).

Powyższy opis techniki wykorzystujący zmodyfikowany układ badawczy SHPB określany jest w literaturze anglojęzycznej terminem *Direct-Impact Hopkinson Test* lub *Taylor cylinder–Hopkinson bar impact experiment* [38].

W ramach pracy badawczej będącej przedmiotem niniejszego artykułu opracowano zmodyfikowaną konfigurację układu badawczego SHPB umożliwiającą wykonanie testów zgodnie z metodyką ww. opisaną techniki. Zastosowano sześciometrowy pręt odbiorczy, stanowiący połączenie dwóch prętów o długości 3 m (rys. 15). Przewidziano użycie prętów wykonanych ze stopu aluminium AW 6060 do badania struktur o małej sztywności lub ze stali C45 o granicy plastyczności 735 MPa do testów struktur wysokowytrzymałych. Dla obydwóch materiałów pręta odbiorczego opracowano odpowiednio pręty-pociski. Przyjęto, że dla założonego zakresu prędkości uderzenia, masa pręta-pocisku będzie tak dobrana, aby jego energia kinetyczna przynajmniej trzykrotnie przewyższała wartość energii mechanicznej potrzebnej na deformację danej struktury. Spełnienie tego założenia zapewnia mały spadek prędkości pręta-pocisku podczas zgniatania struktury do chwili początku procesu jej densyfikacji.

Do rejestracji procesu dynamicznego zgniatania struktury komórkowej wykorzystano cyfrową kamerę szybką Phantom v12. Na podstawie otrzymywanych rejestracji optycznych dokonywano pomiaru zmiany skrócenia próbki w czasie z wykorzystaniem systemu komputerowego TEMA Motion. Przykładowe kadry ilustrujące proces deformacji struktury piany aluminiowej przedstawiono na rys. 16.



Rys. 16. Wybrane sekwencje procesu niszczenia struktury piany aluminiowej

Fig. 16. Selected photo sequence of damage process of aluminum foam structure

## 5. PODSUMOWANIE

Problematyka projektowania i badania regularnych materiałów komórkowych jest obecnie szeroko podejmowana przez wiele ośrodków badawczych w kraju i zagranicą. Upowszechnienie się technologii przyrostowych stworzyło niezwykle możliwości do wytwarzania struktur komórkowych o bardzo skomplikowanych topologiach, niemożliwymi do otrzymania dotychczas stosowanymi technologiami. Przedstawiony w niniejszej publikacji projekt badawczy bardzo dobrze wpisuje się w ten nurt, gdyż podejmuje problematykę energochłonności tytanowych struktur 2D wytwarzanych technologią LENS. Publikacja ma charakter przeglądowy, a podjęte w niej zagadnienia zostały tak dobrane, aby przybliżyć Czytelnikowi problematykę materiałów komórkowych oraz ukazać trudności pojawiające się podczas projektowania, wytwarzania i badania struktur komórkowych wytwarzanych technologiami addytywnymi.

*Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2016-2019,  
jako projekt NCN nr UMO-2015/17/B/ST8/00825 pt.:  
„Zachowania gradientowych struktur komórkowych w warunkach obciążenia  
dynamicznego”.*

## LITERATURA

- [1] Labonnote Nathalie, Anders Rønquist, Benedik Manum, Petra Rüther. 2013. „Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities”. *Automation in Construction* 72 : 347-66.
- [2] Ngo Tuan, Alizera Kashani, Gabriele Imbalzano, Kate Nguyen, David Hui. 2018. “Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods , applications and challenges”. *Composites Part B* 143 : 172-96.
- [3] Thompson Mary, Giovanni Moroni, Tom Vaneker, Georges Fadel, Ian Campbell, Ian Gibson. 2016. “Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints”. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 65 (2) : 737-60.
- [4] Liu Zengqian, Marc Meyers, Zhefeng Zhang, Robert Ritchie. 2017. “Functional gradients and heterogeneities in biological materials: Design principles, functions, and bioinspired applications”. *Progress in Materials Science* 88 : 467-98.
- [5] Banerjee Sourish. 2014. “On the mechanical properties of hierarchical lattices”. *Mechanics of Materials* 72 : 19-32.



- 
- [6] Wadley Haydn. 2006. "Multifunctional periodic cellular metals". *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*: 31-68.
- [7] Kooistra W. Gregory, Haydn Wadley. 2007. "Lattice truss structures from expanded metal sheet". *Materials and Design* 28 (2) : 507-514.
- [8] Yang Li, Ola Harrysson, Harwey II West, Denis Cormier, Chun Park, Kara Peters. 2015. "Low-energy drop weight performance of cellular sandwich panels". *Rapid Prototyping Journal* 21 (4) : 433-442.
- [9] Sun Yongle, Qingming Li. 2017. "Dynamic compressive behaviour of cellular materials: A review of phenomenon, mechanism and modelling". *International Journal of Impact Engineering* 112 : 74-115.
- [10] Mohsenizadeh Mehrdad, Federico Gasbarri, Michael Munther, Ali Beheshti, Keivan Davami. 2018. "Additively-manufactured lightweight Metamaterials for energy absorption". *Materials and Design* 139 : 521-30.
- [11] Restrepo David, Nilesh Mankame, Pablo Zavattieri. 2016. "Programmable materials based on periodic cellular solids. Part I: Experiments". *International Journal of Solids and Structures* 101 : 485-504.
- [12] Restrepo David, Nilesh Mankame, Pablo Zavattieri. 2016. "Programmable materials based on periodic cellular solids. Part II: Numerical analysis". *International Journal of Solids and Structures* 101 : 505-22.
- [13] Tekoğlu Cihan, Lorna Gibson, Thomas Pardoën. 2011. "Size effects in foams: Experiments and modeling". *Progress in Materials Science* 56 (2) : 109-138.
- [14] Liebenstein Stefan, Stefan Sandfeld, Michael Zaiser. 2018. „Size and disorder effects in elasticity of cellular structures: From discrete models to continuum representations". *International Journal of Solids and Structures* 2018 : 1-20.
- [15] Mahesh Mani, Yakesan Wong, Jerry Fuh. 2004. "Benchmarking for comparative evaluation of RP systems and processes". *Rapid Prototyping Journal* 10 : 123-135.
- [16] Mahmood S., A. J. Qureshi, D. Talamona. 2018. "Taguchi based process optimization for dimension and tolerance control for fused deposition modelling". *Additive Manufacturing* 21 (2017) : 183-190.
- [17] Knoop F., V. Schoeppner. 2015. Analysis and optimization of the dimensional accuracy for FDM parts manufactured with ABS-M30. In proceedings of .ASPE Spring Topical Meeting.



- [18] Durejko Tomasz, Michał Zietala, Wojciech Polkowski, Tomasz Czujko. 2014. „Thin wall tubes with Fe3Al/SS316L graded structure obtained by using laser engineered net shaping technology”. *Materials & Design* 63 : 766-774.
- [19] Attar Hooyar, Ehtemam-Haghighi Shima, Kent Damon, Wu Xinhua. 2017. “Comparative study of commercially pure titanium produced by laser engineered net shaping, selective laser melting and casting processes”. *Materials Science and Engineering A*: 385-393.
- [20] Unocic Raymond, Jairton DuPont. 2004. “Process efficiency measurements in the laser engineered net shaping process”. *Metallurgical and Materials Transactions B* 35 : 143-152.
- [21] Hallquist John. 2006. LS-DYNA® theory manual. [http://www.dynasupport.com/manuals/additional/ls-dyna-theory-manual-2005-beta/at\\_download/file](http://www.dynasupport.com/manuals/additional/ls-dyna-theory-manual-2005-beta/at_download/file).
- [22] Tantikom Kanyatip, Tatsuhiko Aizawa. 2005. “Compressive Deformation Simulation of Regularly Cell-Structured Materials with Various Column Connectivity”. *Materials Transactions* 46 (6) : 1154-1160.
- [23] Liu Wangyu, Wang Ningling, Luo Tao, Lin Zhenqiong. 2016. “In-plane dynamic crushing of re-entrant auxetic cellular structure”. *Materials & Design* 100 : 84-91.
- [24] Kucewicz Michał, Paweł Baranowski, Jerzy Małachowski, Arkadiusz Popławski, Paweł Płatek. 2018. „Modelling, and characterization of 3D printed cellular structures”. *Materials & Design* 142 : 177-189.
- [25] Fu Ming-Hui, Chen Yu, Hu Ling Ling. 2017. “A novel auxetic honeycomb with enhanced in-plane stiffness and buckling strength”. *Composite Structures* 160 : 574-585.
- [26] Arve Hanssen, Odd Sture Hopperstad, Magnus Langseth, Havar Ilstad. 2002. “Validation of constitutive models applicable to aluminium foams”, *International Journal of Mechanical Science* 44 : 359-406.
- [27] Baranowski Paweł, Krzysztof Damaziak, Jerzy Małachowski, Łukasz Mazurkiewicz, Artur Muszyński. 2015. „A child seat numerical model validation in the static and dynamic work conditions”. *Archive of Civil and Mechanical Engineering* 15 : 361-375.
- [28] Bao Yingbin, Tomasz Wierzbicki. 2005. “On the cut-off value of negative triaxiality for fracture”. *Engineering Fracture Mechanics* 72 (7) : 1049-1069.
- [29] Bai Yuanli, Xiaoging Teng, Tomasz Wierzbicki. 2009.” On the application of stress triaxiality formula for plane strain fracture testing”. *Journal of Engineering Materials and Technology* 131 (2).

- 
- [30] Bao Yuanli, Tomasz Wierzbicki. 2004. "A comparative study on various ductile crack formation criteria". *Journal of Engineering Materials and Technology* 126 (3) : 314-324.
- [31] Janiszewski Jacek. 2012. *Badania materiałów inżynierskich w warunkach obciążenia dynamicznego*. Warszawa: Wydawnictwo Wojskowej Akademii Technicznej.
- [32] The Hopkinson Bar Facility, <http://elsa.jrc.ec.europa.eu/facility.php?id=hoplabb>, (kwiecień 2018).
- [33] Chen Weinong, Bo Zhang, M.J. Forrester. 1999. „A split Hopkinson bar technique for low-impedance materials”. *Hopkinson Pressure Bar Instrumented with Velocity Gages*. *Experimental Mechanics* 39 : 81-85.
- [34] Chen Weinong, Fangyun Lu, Bo Zhou. 2000. „A Quartz-crystal-embedded Split Hopkinson Pressure Bar for Soft Materials”. *Hopkinson Pressure Bar Instrumented with Velocity Gages*. *Experimental Mechanics* 40 (1) : 1-6.
- [35] Zhao Han, Gary Gérard, Janusz Roman Klepaczek. 1997. "On the use of a viscoelastic split Hopkinson pressure bar". *International Journal of Impact Engineering* 19 (4) : 319-330.
- [36] Casem T. Daniel, William L. Fournery, Peter Chang. 2003. "A Polymeric Split Hopkinson Pressure Bar Instrumented with Velocity Gages". *Experimental Mechanics* 43 (4) : 420-427.
- [37] Janiszewski Jacek, Witold Bużantowicz, Paweł Baranowski. 2016. "Correction procedure of wave signals for a viscoelastic split Hopkinson pressure bar". *Problemy mechatroniki. Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa – Problems of Mechatronics: Armament, Aviation, Safety Engineering* 7 (1) : 17-30.
- [38] Baker W.E., T.C. Togami, J.C. Weydert. 1998. "Static and dynamic properties of high-density metal honeycombs". *International Journal of Impact Engineering* 21 (3) : 149-63.

## **Key Issues of Design and Investigations on Additive Manufactured Regular Cellular Structures**

Jacek JANISZEWSKI, Paweł PŁATEK, Piotr DZIEWIT,  
Katarzyna SARZYŃSKA

*Military University of Technology, Faculty of Mechatronics and Aerospace,  
2 Urbanowicza Str., 00-908 Warsaw, Poland*

**Abstract.** The aim of this paper is to present main issues concerning designing and investigation on 2D regular cellular structures produced using additive manufacturing techniques. Proposed by authors experimental methodology was based on two types of technologically different 3D printings methods with various manufacturing capabilities. FDM (*Fused Deposition Modelling*) technique allowed to analyze wide spectrum of structure topologies under static and impact loading conditions. LENS (*Laser Engineered Net Shaping*) method enabled to produce high strength structures made of titanium alloy Ti6Al4V. This paper presents the most important issues related to the testing process of the regular cellular structures under various loading conditions, in particular under dynamic deformation using the split Hopkinson pressure bar technique (SHPB). The main issues concerning the construction of SHPB experimental setup were presented as well as the specificity of the research methodology on cellular materials in two different Hopkinson bar systems: classic and so-called direct impact. In addition, the extensive discussions on numerical modelling of cellular structures deformation was made. In particular, the emphasis of assumptions necessary for their correct modelling was defined.

**Keywords:** cellular materials, crashworthiness, 3D printing, numerical investigations, Split Hopkinson Pressure Bar

