

Badania eksperymentalne i modelowanie procesu deformacji regularnych struktur komórkowych w warunkach obciążenia quasi-statycznego

Paweł Płatek¹, Jacek Janiszewski¹, Jerzy Małachowski², Piotr Dziewit¹, Marcin Sarzyński¹, Michał Grażka¹,
Paweł Baranowski²

¹ Instytut Techniki Uzbrojenia, Wojskowa Akademia Techniczna

² Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej, Wojskowa Akademia Techniczna

email: pawel.platek@wat.edu.pl, jacek.janiszewski@wat.edu.pl, jerzy.malachowski@wat.edu.pl, piotr.dziewit@wat.edu.pl,
marcin.sarzyński@wat.edu.pl, michal.grazka@wat.edu.pl, pawel.baranowski@wat.edu.pl

STRESZCZENIE: Celem niniejszego artykułu jest scharakteryzowanie modelu numerycznego pozwalającego na analizę przebiegu procesu deformacji wybranych, regularnych struktur komórkowych poddanych działaniu obciążenia quasi-statycznego. Do rozwiązania niniejszego problemu badawczego wykorzystano zarówno eksperymentalną, jak i numeryczną metodę badawczą. Podejście eksperymentalne było realizowane za pomocą jednoosiowej próby ściskania modelowych próbek struktur typu 2D wykonanych techniką addytywną z tworzywa sztucznego ABS. W trakcie testów doświadczalnych określono wpływ topologii geometrycznej struktury na jej właściwości wytrzymałościowe. Analogiczne badania przeprowadzono wykorzystując symulacje komputerowe z zachowaniem takich samych warunków początkowo-brzegowych. Na ich podstawie uzyskano wyniki odwzorowujące przebieg procesu deformacji struktur (wykres siły osiowej w funkcji skrócenia próbek). Porównując wyniki badań otrzymano zadowalającą zgodność rozwiązania numerycznego z danymi eksperymentalnymi. Opracowane modele numeryczne będą wykorzystane w dalszych badaniach nad właściwościami wytrzymałościowymi struktur wykonanych ze stopu tytanu za pomocą techniki przyrostowej LENS.

SŁOWA KLUCZOWE: modelowanie numeryczne, metoda elementów skończonych, regularne struktury komórkowe, druk 3D

1. Wstęp

Współczesny postęp w dziedzinie inżynierii materiałowej oraz możliwości nowych, addytywnych technologii wytwarzania (tzw. druk 3D), przyczyniają się do wzrostu dynamiki rozwoju w zakresie opracowywania nowych materiałów konstrukcyjnych oraz funkcjonalnych o strukturze komórkowej [1]. Jedną z charakterystycznych cech materiałów tego typu w odniesieniu do materiałów litych jest niska wartość ich gęstości relatywnej, którą określa się jako stosunek gęstości gabarytowej elementu (m/V), do gęstości materiału (ρ) z jakiego został on wykonany [2]. Materiały tego rodzaju pozwalają na optymalizację masy nowoprojektowanych konstrukcji mechanicznych przy zachowaniu relatywnie wysokich właściwości wytrzymałościowych [1]. Są one stosowane w wielu gałęziach przemysłu, m.in.: motoryzacyjnym, lotniczym, kolejowym, chemicznym, militarnym oraz w budownictwie. Zakres ich praktycznego wykorzystania uwarunkowany jest rodzajem struktury, która może mieć charakter regularny, (np. plaster miodu - *honeycomb*) lub stochastyczny o nieregularnej topologii geometrycznej (np. piany metaliczne, polimerowe, ceramiczne).

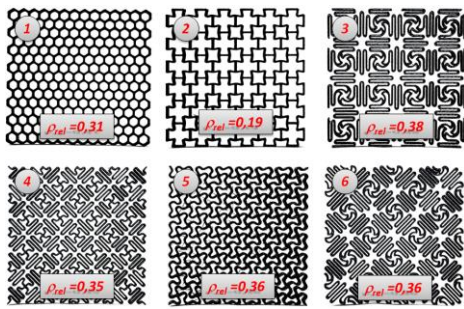
Międzywydziałowy zespół naukowo-badawczy Wojskowej Akademii Technicznej realizuje od kwietnia 2016 roku projekt badawczy, którego nadrzędnym celem jest poznanie mechanizmów odpowiedzialnych za przebieg procesu deformacji regularnych struktur komórkowych wykonanych techniką przyrostową LENS w warunkach obciążenia statycznego oraz dynamicznego. Głównym powodem podjęcia niniejszego tematu badawczego było dostrzeżenie ograniczeń w kształtowaniu cech użytkowych dotychczas produkowanych materiałów komórkowych (najczęściej o strukturze stochastycznej) [3] lub regularnej w postaci topologii geometrycznej plastra miodu [4]. Zastosowanie na etapie prac studyjnych współbieżnego projektowania, modelowania numerycznego, wytwarzania

za pomocą techniki przyrostowej (metoda LENS) [5] umożliwi uzyskanie nowych właściwości funkcjonalnych projektowanych materiałów komórkowych.

Celem niniejszej publikacji jest przedstawienie wstępnych wyników prac realizowanego projektu badawczego. Omówiono w niej zaproponowaną metodykę badawczą o charakterze eksperymentalno-numerycznym pozwalającą na ocenę właściwości wytrzymałościowych projektowanych struktur komórkowych typu 2D w warunkach obciążenia quasi-statycznego.

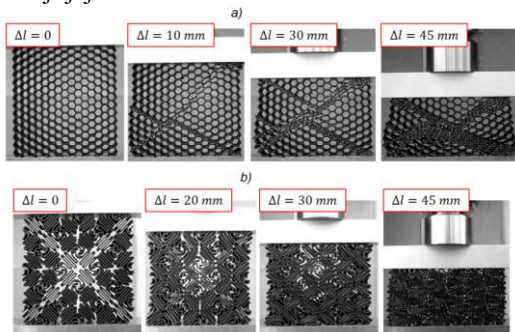
2. Charakterystyka zastosowanej metodyki badawczej

W celu skorelowania topologii geometrycznej regularnych struktur komórkowych z ich właściwościami wytrzymałościowymi wykonano badania o charakterze eksperymentalnym oraz numerycznym. Testy doświadczalne polegały na przeprowadzeniu quasi-statycznych prób jednoosiowego ściskania. Próbkę użyte do testów wykonano techniką przyrostową za pomocą metody FDM (*Fused Deposition Modeling*) z tworzywa sztucznego *ABSplus*. Przed przystąpieniem do realizacji procesu projektowania struktur przyjęto następujące założenia: wykonanie próbek w postaci prostopadłościanów o zbliżonych wymiarach gabarytowych (80x80x20mm), ścianki struktury o grubości 1 mm, jednakowe parametry procesu technologicznego (temp. dyszy 300°C, temp. komory roboczej 80 °C, grubość warstwy 0,33 mm, wypełnienie próbki – typu *Solid*). Na rys.1 przedstawiono przykładowe rodzaje geometrii struktur. Bazą do ich opracowania była struktura plastra miodu oznaczona symbolem 1. W wyniku przeprowadzonych prac studyjnych nad geometrią struktur, oprócz typowych struktur o dodatniej wartości współczynnika Poisson'a (indeksy od 1 do 3), opracowano również struktury austetyczne, tj. charakteryzujące się ujemną wartością współczynnika Poisson'a (indeksy od 4 do 6).



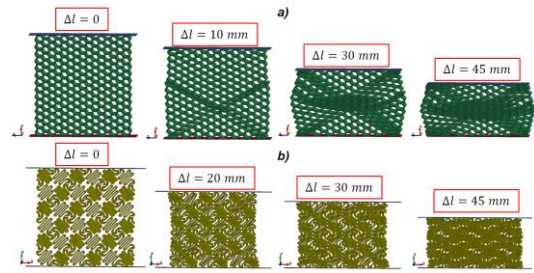
Rys. 1. Przykładowe struktury 2D o różnej topologii i gęstości relatywnej

Badania wytrzymałościowe przeprowadzono z wykorzystaniem maszyny wytrzymałościowej MTS Criterion C45. Ściskanie struktur realizowano na kierunku prostopadłym do powierzchni bocznej próbki, tj. powierzchni zgodnej z kierunkiem nakładania warstw (rys. 2). W trakcie ściskania trawersa maszyny wytrzymałościowej przemieszczała się z prędkością 1 mm/s. Próby ściskania prowadzono do uzyskania odkształcenia struktury na poziomie 50% na kierunku działania siły. Na podstawie przeprowadzonych testów wyznaczono krzywe ściskania oraz wykresy odwzorowujące zmianę energii deformacji struktury w funkcji jej skrócenia.

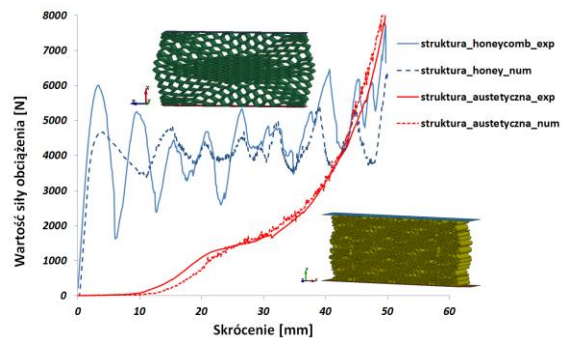


Rys. 2. Przykładowy przebieg procesu deformacji struktury klasycznej – a) i austetycznej – b)

Modelowanie numeryczne procesu deformacji struktur przeprowadzono bazując na modelach geometrii CAD zastosowanych do wykonania próbek wytrzymałościowych. Dzięki nim opracowano modele MES, które poddano wirtualnej próbie ściskania w środowisku pakietu obliczeniowego LS-Dyna [6]. Przyjęte warunki początkowo-brzegowe były takie same, jak w przypadku badań eksperymentalnych. Właściwości materiałowe struktur opisano za pomocą modelu konstytutywnego, sprężysto-plastycznego ze wzmocnieniem. Symulacje komputerowe zrealizowano z wykorzystaniem schematu całkowania numerycznego typu *Implicit*. Zastosowana w modelach procedura kontaktu uwzględniała wpływ tarcia na przebieg procesu deformacji. Na rys.3 przedstawiono przykładowe przebiegi procesu deformacji dla struktur zaznaczonych na rys.1 indeksami 1 oraz 6. Przedstawione na rys.4 krzywe odzwierciedlają zmianę przebiegu siły obciążenia działającej na strukturę w funkcji jej skrócenia. Porównując rozwiązanie numeryczne z wynikami eksperymentalnymi można stwierdzić, że zaproponowana metoda modelowania numerycznego z zadawalającą dokładnością odwzorowuje proces deformacji rzeczywistych struktur komórkowych.



Rys.3. Przebieg procesu deformacji uzyskany w wyniku symulacji komputerowej



Rys.4. Porównanie wyników symulacji komputerowej z danymi eksperymentalnymi

3. Podsumowanie

Zaproponowana metoda modelowania numerycznego dobrze odzwierciedla zachowanie się rzeczywistych struktur komórkowych w warunkach obciążenia quasi-statycznego. Dzięki opracowanym modelom numerycznym możliwa będzie ocena metodami symulacyjnymi nowo opracowanych regularnych struktur komórkowych typu 2D oraz 3D ze względu na ich wytrzymałość i energochłonność. Niniejsze podejście pozwoli również w znaczący sposób na zredukowanie kosztów badań doświadczalnych struktur wykonanych techniką LENS.

Artykuł zawiera wyniki pracy finansowanej przez NCN ze środków na naukę w latach 2016 - 2018, jako projekt rozwojowy nr NCN/07-380

Obliczenia numeryczne zostały wykonane przy wsparciu Interdyscyplinarnego Centrum Modelowania Matematycznego i Komputerowego (ICM) Uniwersytetu Warszawskiego w ramach grantu obliczeniowego nr GB65-19

Literatura

- [1] G. Stephani, O. Andersen, P. Quadbeck, B. Kieback. 2010. „Cellular Metals for Functional Applications – an Overview”. PM2010 World Congress – Foams & Porous Materials.
- [2] Xiong Zhang, Hui Zhang, Zhuzhu Wen. 2014. *Experimental and numerical studies on the crush resistance of aluminum honeycombs with various cell configurations*. International Journal of Impact Engineering, vol. 66 p. 48-59.
- [3] Kłasztorny M., Małachowski J., Dziewulski P., Nycz D., Gotowicki P., *Badania eksperymentalne i modelowanie piany aluminiowej alporas*, Modelowanie inżynierskie, T.12, str.97-112, 2012.
- [4] T.N. Bitzer. 1997. *Honeycomb Technology: Materials, design, manufacturing, applications and testing*, Cambridge University Press.
- [5] K. Oczko. 2008. Rosnące znaczenie *Rapid Manufacturing w przyrostowym kształtowaniu wyrobów*, *Mechanik* 4/2008, p. 241-257.
- [6] Hallquist J. O., *LS-DYNA. Keyword User's Manual*, V971 R4 Beta, LSTC Co., CA, USA 2009.