

# Analiza wytrzymałościowa struktury typu plaster miodu w elementach podporowych

## The strength analysis of honeycomb structure in the support elements

MAŁGORZATA JOHN  
ANTONI JOHN  
WOJCIECH SKARKA \*

DOI: 10.17814/mechanik.2016.4.43

Artykuł z XIII Forum Inżynierskiego ProCAx 2015

Zaproponowano strukturę typu plaster miodu w konstrukcjach, w których masa jest ważnym czynnikiem brany pod uwagę podczas projektowania. Struktura ta jest lekka i wytrzymała. Przeprowadzono symulację próby trójpunktowego zginania z wykorzystaniem MES. Zmieniano grubość ścianki, parametry materiałowe, wzajemną orientację i wymiary kolejnych warstw komórek.

**SŁOWA KLUCZOWE:** struktura plaster miodu, symulacja numeryczna, próba trójpunktowego zginania, szybkie prototypowanie, MES

*Honeycomb profile is suggested for effective use in the engineering structures critically required for the lowest possible weight without negative effect on the load capacity. Simulation trials (three-point bending test) were performed using FEM. Cell wall thicknesses, material properties, orientation of successive layers and dimensions of the particular cell layers were consequently changed to suit the tests.*

**KEYWORDS:** honeycomb structure, numerical simulation, three-point bending test, rapid prototyping, FEM

Przeanalizowano zastosowanie analogii biologicznych przy projektowaniu sprzętu, gdzie masa jest istotnym czynnikiem. Proponowane rozwiązanie oparto na strukturze typu plaster miodu. Jest ona wykorzystywana w różnych gałęziach przemysłu i dobrze spełnia swoją rolę. Jest też stosunkowo lekka i wytrzymała [1, 5, 8]. Dlatego badano wykorzystanie tej struktury w elementach podporowych egzoszkieletu kończyny dolnej człowieka. Badania miały na celu poprawę kształtu geometrycznego komórek wewnętrznych i właściwości zastosowanego materiału.

Naukowcy z Karlsruhe Institute of Technology (KIT) w Niemczech wytwarzali z użyciem laserowej litografii materiał o gęstości mniejszej niż woda, czyli  $0,81 \text{ g/cm}^3$ , i wytrzymałości na ściskanie równej  $280 \text{ MPa}$ . Wartość ta jest porównywalna z analogicznymi właściwościami niektórych gatunków stali. Niemieccy naukowcy przeanalizowali kilka koncepcji i rodzajów konstrukcji typu plaster miodu. Najlepsze wyniki otrzymali dla litego panelu [1].

Właściwości tego typu struktury wpłyną na zmniejszenie wagi egzoszkieletu, zapotrzebowania na moc silników napędowych i zużycia energii. Dzięki temu całkowity koszt urządzenia również zostanie zredukowany.

Materiałem biologicznym o podobnych własnościach jest tkanka kostna. Ze względu na porowatą strukturę i budowę wewnętrzną dostosowaną do przenoszenia obciążeń kości bardzo dobrze spełniają funkcję podporową. Na podstawie wcześniejszych badań (próby trójpunktowego zginania) przyjęto wartość modułu Younga równą  $15 \text{ GPa}$ . Przeprowadzono testy numeryczne próbek wyciętych z kości długich wykorzystanych w próbie trójpunktowego zginania.

Sprawdzono wpływ czworosiecznych elementów z liniową i kwadratową funkcją kształtu oraz heksagonalnych elementów ośmiowęzłowych z liniową i kwadratową funkcją kształtu na uzyskane wyniki. Zmieniano również wielkość elementów (gęstość siatki). Na podstawie wyników symulacji numerycznych wybrano optymalny model zawierający heksagonalne elementy ośmiowęzłowe z liniową funkcją kształtu i odległością między węzłami  $0,4 \text{ mm}$  [2, 6, 7].

W trakcie testowania modelu zauważono, że gęstość siatki i typy elementów wpływają na rozkład naprężeń i przemieszczeń. Jednak zwiększenie liczby stopni swobody modelu dzięki zastosowaniu kwadratowych funkcji kształtu (elementów takich jak Tet10 i Hex20) nie wpływa znacząco na poprawę uzyskiwanych wyników, ale istotnie wydłuża czas obliczeń.

Struktura wewnętrzna tkanki kostnej jest niejednorodna, w większości anizotropowa, jednak ze względu na trudności związane z uzyskaniem odpowiednich danych materiałowych z reguły przyjmuje się model materiału jako jednorodny, izotropowy.

W modelu numerycznym brano pod uwagę tylko część korową kości długich. Część gąbczasta pełni m.in. funkcję krwiotwórczą, stanowi również główny budulec nasad kości długich. W wytrzymałości główną rolę odgrywa kość korowa. Zaproponowano zatem strukturę kości korowej jako wewnętrzną strukturę elementów podporowych konstrukcji egzoszkieletu. W modelu numerycznym zaniedbano kość beleczkową.

Układ komórek korowych w strukturze zależy od obciążenia, które występuje w danym miejscu kości. Założono jednorodny, izotropowy model materiału kostnego. W zaawansowanych symulacjach, zwłaszcza w procesie budowy modelu numerycznego, należy stosować dane uzyskane z eksperymentu, tomografii komputerowej oraz systemu Mimics. Ułatwia to zbudowanie niejednorodnego modelu tkanki kostnej [3]. Badania przeprowadzone w ramach pracy nie wymagają tak dokładnych wyników.

### Symulacja

Model numeryczny próbki zbudowany ze struktury typu plaster miodu utworzono w systemie MSC.Patran/Nastran. W modelu bazowym przyjęto długość każdej ściany i wysokość komórki  $1 \text{ mm}$ , a grubość ścianki  $0,25 \text{ mm}$ . Wartości materiałowe przyjęto jak dla materiału typu ABS, który jest wykorzystywany w szybkim prototypowaniu. Chodzi o to, aby drukować na drukarce 3D próbki i badać je na maszynie wytrzymałościowej.

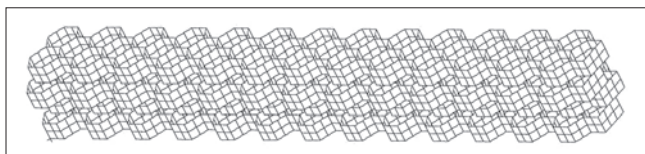
Przyjęto sześciokątny kształt komórek. W literaturze można także znaleźć np. komórki wklęsłe [8]. Postanowiono jednak zbadać strukturę opartą na biologicznej analogii. Na tym etapie zmieniano grubość ścianki, parametry materiałowe, wzajemną orientację i wymiary kolejnych warstw komórek, ale nie ich kształt.

\* Mgr inż. Małgorzata John (malgorzata.john@polsl.pl), prof. dr hab. inż. Antoni John (antoni.john@polsl.pl), dr hab. inż. Wojciech Skarka prof. Pol. Śl. (wojciech.skarka@polsl.pl) – Politechnika Śląska

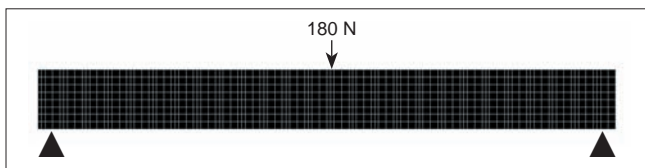
W symulacji przyjęto siłę 360 N. Wynikało to z wcześniejszych badań wykonanych na próbkach ludzkiej kości. Aby móc porównać otrzymane wyniki z poprzednimi badaniami, rozmiar modeli składających się z komórek sześciokątnych został dostosowany do wymiarów próbki kości –  $4 \times 4 \times 40$  mm (rys. 1).

Warunki brzegowe przyjęto zgodnie z próbą trójpunktowego zginania. Miejsce przyłożenia siły, a także miejsce występowania podpór ustalono w oparciu o przeprowadzone wcześniej badania. Siłę przyłożono w środku długości próbki (w poprzek długości dwa razy 180 N), podpory umieszczono w odległości 0,5 mm od obu końców ścian bocznych. Lewa podpora mogła przemieszczać się wzdłuż osi wzdłużnej próbki. To pozwoliło na porównanie uzyskanych wyników oraz określenie przydatności obu struktur. W dalszych badaniach będą budowane modele oparte na różnych typach struktur wewnętrznych w celu znalezienia optymalnego rozwiązania.

Schemat warunków brzegowych przyjętych w modelu numerycznym przedstawiono na rys. 2.



Rys. 1. Model numeryczny struktury typu plaster miodu



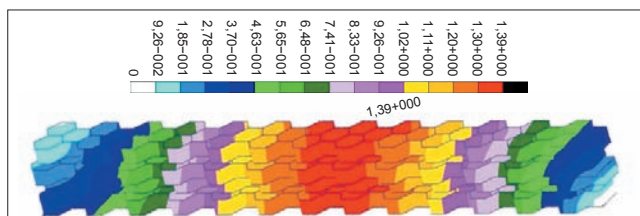
Rys. 2. Warunki brzegowe przyjęte w modelu – widok z boku

Początkowo zmieniano cechy geometryczne, a własności materiałowe pozostawiano takie same. Wyniki symulacji numerycznej próby trójpunktowego zginania nie spełniały kryteriów wytrzymałościowych. Przemieszczenia przekraczały wartości dopuszczalne. Zdecydowano więc o zmianie właściwości materiału. Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że ABS – materiał stosowany w szybkim prototypowaniu – nie najlepiej nadaje się do tego typu konstrukcji. Moduł Younga materiału ABS, w zależności od producenta, waha się między 1,6 a 2 GPa, a współczynnik Poissona wynosi około 0,38.

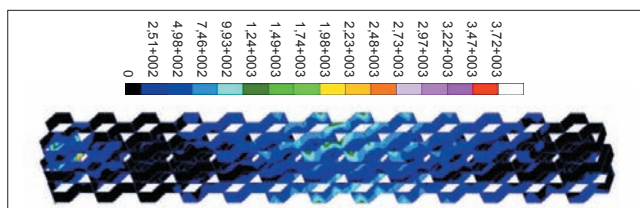
W kolejnym kroku wartości parametrów materiałowych przyjęto takie jak dla aluminium. Założono odpowiednio moduł Younga o wartości 70 GPa i współczynnik Poissona 0,33. Powrócono do pierwotnego kształtu i wzajemnego ułożenia warstw komórek. Po wprowadzeniu tych zmian uzyskano znacznie lepsze wyniki symulacji numerycznych w odniesieniu do przemieszczeń i naprężeń.

Wartości przemieszczeń w zilustrowanym przypadku (rys. 3) zmniejszały się od 381 mm do 5,18 mm. Rozkłady w obu przypadkach były bardzo zbliżone. Poprawa była znaczna, ale wciąż niewystarczająca. Zmieniono więc właściwości materiałowe z aluminium na stal chirurgiczną. Ponownie zaobserwowano poprawę wyników. Na następnym etapie powrócono do właściwości materiałowych aluminium, grubość ścianki zwiększono od 0,25 do 0,5 mm.

Chociaż przemieszczenia (po zwiększeniu grubości ścianki do 0,45 mm) zbliżyły się do akceptowalnego poziomu (rys. 3, maksymalne przemieszczenie wynosi 1,39 mm), naprężenia wciąż jeszcze przekraczały dopuszczalną wartość (granice plastyczności, rys. 4) [4].



Rys. 3. Rozkład przemieszczeń po zmianie materiału z ABS na aluminium (w mm)



Rys. 4. Rozkład naprężeń w modelu o własnościach materiałowych aluminium (w MPa)

## Wnioski

Celem pracy była modyfikacja struktury typu plaster miodu zastosowanej w modelu numerycznym próbki poddanej trójpunktowemu zginaniu. Oczekiwanym efektem miało być zmniejszenie przemieszczeń i naprężeń uzyskanych w symulacji trójpunktowego zginania. Efekt starano się osiągnąć przez zmianę grubości ścianki, parametrów materiałowych, wzajemnego położenia kolejnych warstw komórek i wymiarów komórek. Każdy z tych parametrów wpływał na uzyskane wyniki, jednak największe znaczenie miał materiał, z którego sporządza się próbkę.

Lepsze wyniki symulacji uzyskano dla aluminium niż dla materiału typu ABS. Aluminium znacznie lepiej przenosi obciążenia, a przemieszczenia są mniejsze. Zaletą materiału typu ABS jest możliwość szybkiej i taniej produkcji próbek w celu zweryfikowania wyników analizy numerycznej na maszynie wytrzymałościowej. Masa próbki jest znacznie mniejsza w porównaniu z próbkami wykonanymi z aluminium. Taki materiał może być stosowany do elementów, które nie przenoszą dużych obciążeń, ale służą jako korpus, części tłumiące drgania. Odpowiednia zmiana cech geometrycznych struktury typu plaster miodu wpływa na poprawę wyników. Niektóre zmiany spowodowały jednocześnie wzrost wagi. Tylko zmiana położenia kolejnych warstw nie miała znaczenia dla masy próbki.

## LITERATURA

1. Bauera J., Hengsbach S., Tesari I., Schwaiger R., Kraft O. "High-strength cellular ceramic composites with 3D microarchitecture". *PNAS*. Vol. 18, No. 7 (2014): pp. 2453+2458.
2. Będziński R. „*Biomechanika inżynierska. Zagadnienia wybrane*”. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1997.
3. John A. „*Modelowanie zmian osteoporotycznych i ocena ich skutków w kości miedniczej człowieka*”. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2013.
4. John M., John A. „The influence of the model parameters of „honeycomb” structure on mechanical properties”. *Mechanika 2015. Proceedings of the 20th International Scientific Conference*, 23–24 April 2015, Kaunas, 2015, pp. 116+119.
5. John M., Skarka W., „Zastosowanie analogii biologicznej do kształtowania postaci konstrukcyjnej elementów nośnych urządzenia egzozkieletowego”. *Aktualne Problemy Biomechaniki*. Nr 8 (2014): s. 63+68.
6. Kokot G. „*Wyznaczanie własności mechanicznych tkanek kostnych z zastosowaniem cyfrowej korelacji obrazu, nanoindentacji oraz symulacji numerycznych*”. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2013.
7. Kutz M. „*Standard Handbook of Biomedical Engineering & Design*”. New York: McGRAW-HILL, 2003.
8. Masters I., Evans K. „Models for the elastic deformation of honeycombs”. *Composite Structures*. Vol. 35, No. 4 (1996): pp. 403+422. ■