

Metamateriały mechaniczne wytwarzane w sposób przyrostowy

Mechanical metamaterials manufactured by increasing technology

REMIGIUSZ KNITTER
TOMASZ KRÓLIKOWSKI*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.7.65>

Prezentowano pierwszą fazę prac, która obejmowała badania mechanizmów metamaterialnych z gumopodobnych tworzyw sztucznych, a także wpływu ich struktury i geometrii na przenoszenie zadanej siły oraz przemieszczenia w zaprojektowanym modelu, wykonanym techniką przyrostową FDM (*fused deposition modeling*). Celem pracy jest ustalenie wpływu parametrów technologicznych oraz zmian geometrii i wypełnienia na parametry wytrzymałościowe wytwarzanego obiektu, a także rozważenie możliwości zastąpienia klasycznych zespołów elementów mechanicznych elementami wykonanymi z użyciem struktur metamaterialnych.

SŁOWA KLUCZOWE: drukarki 3D, technologie przyrostowe, metamateriał, metamateriały mechaniczne

Presented is the first phase of work, which concerned the study of metamaterial mechanisms made of rubber-like plastics, and the impact of their structure and geometry on the transfer of a given force and displacement in a designed model, made using FDM (fused deposition modeling). The aim of the work is to examine the impact of technological parameters and changes in geometry and filling on the strength parameters of the manufactured object and further considerations on replacing the classic assemblies of mechanical elements with elements made using metamaterial structures.

KEYWORDS: 3D printers, additive technologies, metamaterial, mechanical metamaterial

Techniki przyrostowe są intensywnie rozwijane od początku lat 80. Polegają one na tworzeniu elementów warstwa po warstwie, dzięki czemu możliwe jest uzyskiwanie przedmiotów o skomplikowanej budowie wewnętrznej albo materiałów gradientowych o zmiennych parametrach materiałowych.

Początkowo wytwarzanie przyrostowe było przydatne do przygotowywania jednostkowych prototypów. Z czasem, wraz z opracowaniem różnych technik wytwarzania przyrostowego, możliwe stało się zastosowanie w nich typowych tworzyw, z których produkowane są przedmioty codziennego użytku, takich jak ABS, biodegradowalne PLGA i PLLA (można z nich wykonywać np. stenty do użytku medycznego) oraz metal (do wytwarzania komponentów silników samolotowych, a nawet raketowych).

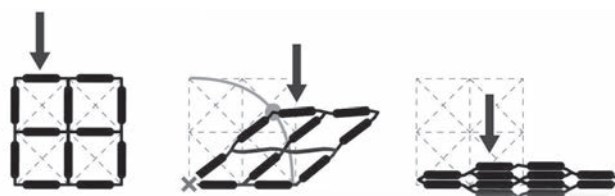
Opisywana metoda pokazuje etapy projektowania metamateriałów, obejmujące modelowanie odwziewiające geometrię oraz dobór optymalnych parametrów

(wytrzymałości, funkcjonalności). W związku z rewolucją przemysłową 4.0 poszukuje się zaawansowanych metod projektowania oraz wykonywania detali, często jednostkowych, lub krótkich serii produkcyjnych.

W ostatnich publikacjach naukowych [10] opisywane są nowe konstrukcje, w których ważną rolę odgrywają nie tylko kształty, ale także ich wewnętrzna mikrostruktura. Takie obiekty, oparte zwykle na sieciach trójwymiarowych, znane są również jako metamateriały i mogą być stosowane do tworzenia materiałów z miękkimi i twardymi regionami.

Mechanizmy metamaterialne składają się z pojedynczego bloku materiału, którego komórki oddziałują na siebie w ściśle określony sposób, aby uzyskać zaprojektowany ruch makroskopowy. Kluczowym elementem jest tu wyspecjalizowany typ komórki, której charakter określa zdolność na ścinanie. Metamateriały są sztucznymi strukturami, zwykle z powtarzającymi się wzorami wewnętrznych węzłów połączeniowych. Niezwykle właściwości zawdzięczają raczej swojej geometrii niż materiałowi, z którego są wykonane. Struktury metamateriałów zostały zoptymalizowane przez algorytmy określające zaprogramowany kierunek ruchu z uwzględnieniem wyników badań eksperymentalnych.

Rozwojowi metamateriałów mechanicznych sprzyjają postępy w metodzie przyrostowej, czyli druku 3D o wysokiej rozdzielczości. Przykładem tego jest drukowany materiał Bickela z porami, które obniżają jego odporność na równomierną kompresję, tzn. ogólną sztywność.



Rys. 1. Zachowanie kwadratowej komórki metamaterialnej na skutek przyłożenia siły [9]

Typowe metamateriały mechaniczne są charakteryzowane czterema stałymi: modułem Younga E , modułem Kirchoffa G , modułem masy K i współczynnikiem Poissona ν . Trzy pierwsze z nich odpowiadają za sztywność i ściśliwość materiału z punktu widzenia inżynierii. Na tym etapie dokonuje się przeglądu wyników optymalizacji topologii strukturalnej przy wykorzystaniu podstawowych zasad projektowania, w połączeniu z badaniami eksperymentalnymi, aby uzyskać różne, sprzeczne z intuicją właściwości mechaniczne [1–3, 6].

* Mgr inż. Remigiusz Knitter (remigiusz.knitter@tu.koszalin.pl), prof. nadzw. dr hab. inż. Tomasz Królikowski (tomasz.krolikowski@tu.koszalin.pl) – Katedra Mechatroniki i Mechaniki Stosowanej, Wydział Technologii i Edukacji Politechniki Koszalińskiej

Artykuł przedstawia zaprojektowany metamateriał o aktywnie kontrolowanych właściwościach mechanicznych. Metamateriał ma odkształcalną strukturę i elementy aktywujące, które można kontrolować oraz symulować komputerowo metodą elementów skończonych. W jednym aspekcie przypomina kompozyt, w którym łączność pomiędzy materiałami składowymi lub kształtem i układem materiałów składowych jest dynamicznie kontrolowana, tak aby wpływać na właściwości mechaniczne metamateriału.

Kompozyty mogą również być materiałami wielofunkcyjnymi, minimalizować rozmiar i masę, zarówno jako sterowane komponenty mechaniczne, jak i konstrukcje wsporcze. Jednym z takich wielofunkcyjnych zastosowań jest inteligentna lub kołowa skóra, która pełni funkcję ochronną, adaptacyjną i funkcjonalną (np. pochłaniania energii).

Przedstawione badania stanowią początkowy etap prac nad wytrzymałością elementów wydrukowanych na drukarkach przestrzennych w różnych technologiach. Na tym etapie zastosowano metodę FDM (*fused deposition modeling* – osadzanie topionego materiału).

Zaprezentowano wyniki badań nad wytrzymałością na rozciąganie próbek wydrukowanych z materiału gumopodobnego Fiberflex 40D (firmy Fiberlogy) na drukarce 3D (firmy Blixi B24), przy odpowiednio dobranych parametrach dla materiału i drukarki.

Podstawowe dane materiałowe podawane przez producentów i dystrybutorów materiałów stosowanych w metodzie FDM, takie jak wytrzymałość na rozciąganie i moduł Younga, dotyczą najkorzystniejszego ustawienia modelu podczas wydruku. Jednakże obiekt wyprodukowany technologią przyrostową, a zwłaszcza metodą FDM, jest bardzo silnie zróżnicowany warstwowo (w kierunku osi Z). Istotny jest również kierunek nakładania materiału (w płaszczyźnie XY) [5]. Na wytrzymałość wpływają też gęstość i rodzaj wypełnienia wnętrza modelu oraz temperatura podczas drukowania. Z tych powodów w przypadku konkretnych materiałów konieczne jest rozpoznanie zależności pomiędzy parametrami technologicznymi a otrzymywaną wytrzymałością.

Metamateriały to struktury kompozytowe, zaprojektowane i wytworzone przez człowieka, niewystępujące w przyrodzie. Wykazują nowe, nietypowe właściwości, determinowane przede wszystkim przez morfologię struktury, a w mniejszym stopniu przez skład chemiczny/fazowy. Szczególnym przypadkiem metamateriałów są nano-hetero-struktury [9].

Budowa struktur metamaterialnych

Budowa struktur zależy od ich przeznaczenia. Wszystkie struktury powinny być tej samej wielkości i geometrii, ustawione tak, aby w symulacji metodą elementów skończonych wykonywały określone zadania.

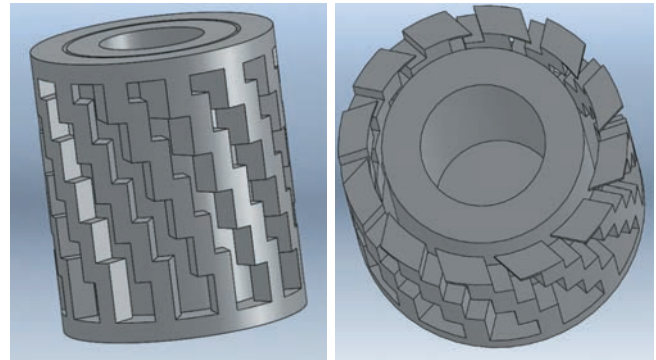
Podczas wstępnych badań rozpatrywano element, który miał zastąpić sprężynę, w której występuje liniowa zależność siły sprężystości F od wychylenia sprężyny z położenia równowagi x .

$$F = -kx$$

gdzie: k – współczynnik sprężystości (stała sprężyny), określa przyrost siły wraz z ugięciem sprężyny.

Wówczas energia zgromadzona w odkształconej sprężynie wynosi:

$$E_p = \frac{1}{2} kx^2$$



Rys. 2. Badany element zamodelowany w środowisku CAD 3D

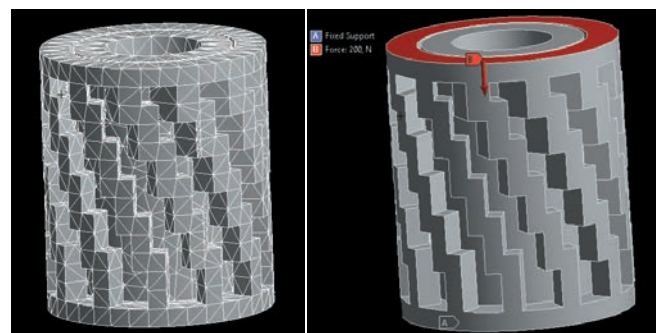
Zamodelowana struktura została wydrukowana na drukarce 3D FDM Blixi B24 z materiału Fiberlogy Fiberflex 40D, który charakteryzuje się wydłużeniem na poziomie 680%. Filament wykazuje wysoką udatność również w niskiej temperaturze (nawet przy -40°C). Jest też bardzo odporny termicznie (do temperatury 70°C), chemicznie i na ścieranie.

TABLICA. Parametry wydruku badanego elementu metodą FDM

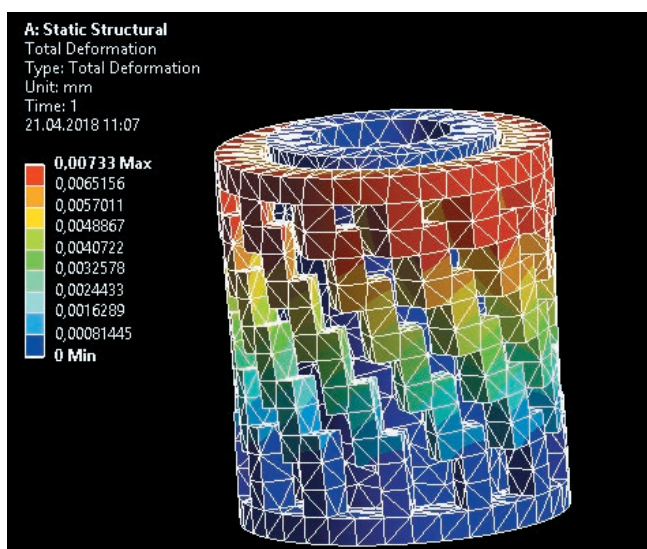
Drukarka	FDM Blixi B24-Multi
Temperatura głowicy	210°C
Temperatura stołu	45°C
Prędkość podawania materiału	20 mm/s
Chłodzenie (obroty wentylatora)	pierwsza warstwa: 20% kolejne warstwy: 40%
Średnica dyszy	0,4 mm
Filament	Fiberlogy Fiberflex 40D czarny
Średnica filamentu	1,75 mm
Wysokość warstwy	0,2 mm
Rodzaj wypełnienia	krzyżowe 45°
Wypełnienie	pełne ($\pm 100\%$)

Symulacja metodą elementów skończonych

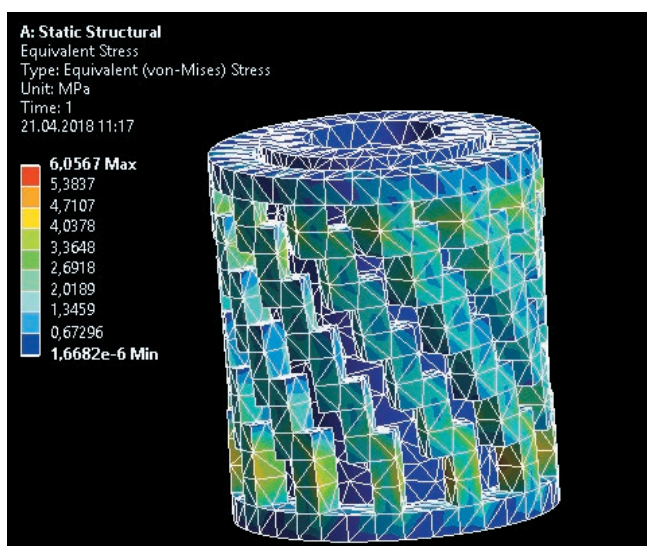
Symulacja komputerowa metodą elementów skończonych została przeprowadzona w programie ANSYS. Element miał się odkształcić w zadanych granicach sprężystości.



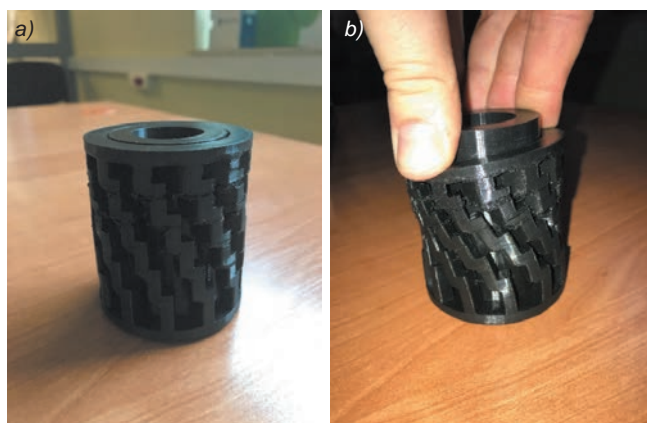
Rys. 3. Siatka elementów skończonych oraz założenia przyjęte w programie ANSYS (siła 200 N, utwierdzona podstawa geometrii)



Rys. 4. Wyniki deformacji badanego elementu w obliczeniach komputerowych



Rys. 5. Wykres naprężeń zredukowanych Huberta-Misesa badanego elementu



Rys. 6. Sprężyna z prowadzeniem wykorzystującym komórki metamateriałowe, wykonana metodą FDM: a) przed przyłożeniem siły, b) po przyłożeniu siły

Dalszy planowany etap badań

Wstępne badania wykazały bardzo dużą elastyczność struktury, wykraczającą poza zakres posiadanej aparatury pomiarowej (brak możliwości doprowadzenia do



Rys. 7. Próbkę przygotowane do badań

zerwania próbki o zamodelowanej strukturze). Dalsze działania mają na celu opracowanie metodyki projektowania struktur, pozwalającej na uzyskanie pożądanych właściwości mechanicznych; zakładają też przeprowadzenie badań eksperymentalnych zaprojektowanych mechanizmów.

Kształtki zostały zamodelowane w programie Solid Works, zgodnie z normami ISO 3167 oraz ISO 294 [6, 7].



Rys. 8. Struktura próbki rozciąganej podczas badań wstępnych

LITERATURA

1. Dziewit P., Janiszewski J. „Ocena jakościowa procesu deformacji regularnych struktur komórkowych wykonanych techniką druku 3D”. *Mechanik*. 3 (2018): s. 250–252.
2. Kinsler P., McCall W. „The futures of transformations and metamaterials”. Blackett Laboratory, Imperial College London, Prince Consort Road, London SW7 2AZ, United Kingdom.
3. Kret M. „Drukarki 3D – porównanie”. *Mechanik*. 11 (2010): s. 864–866 (polskie opracowanie na podstawie T.A. Grimm & Associates, Inc: 3D Printer Benchmark – North American Edition. www.tagrimm.com/benchmark-2010).
4. Madej J., Śliwka M. „Badanie parametrów mechanicznych struktur drukowanych o różnym zagęszczeniu”. *Mechanik*. 11 (2017): s. 1072–1074.
5. Miazio Ł. „Badanie wytrzymałości na rozciąganie próbek wydrukowanych w technologii FDM z różną gęstością wypełnienia”. *Mechanik*. 7 (2015): s. 533–538.
6. PN-EN ISO 527... – Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu.
7. Normy ISO 3167 i ISO 294 dotyczące wykonywania i geometrii kształtek z tworzyw termoplastycznych stosowanych do badań.
8. Novakova-Marcincinova L., Novak-Marcincin J. „Testing of materials for rapid prototyping fused deposition modelling technology”. World Academy of Science. *Engineering and Technology*. 70 (2012).
9. Schumacher C., Bickel B., Rys J., Marschner S., Daraio C., Gross M. „Microstructures to control elasticity in 3D printing”. *ACM Transactions on Graphics*. 34, 4 (2015).
10. Vinay H. Ba, Govindarajub H.K., Prashanth Banakarc. „AMMMT 2016 Experimental Study on Mechanical Properties of Polymer Based Hybrid Composite Materials Today”. *Proceedings*. 4 (2017): s. 10904–10912.