

Recenzja rozprawy habilitacyjnej dr Krzysztofa Karola Dudka.

Określenie osiągnięcia naukowego będącego podstawą ubiegania się o nadanie stopnia doktora habilitowanego.

Cykl prac pod tytułem „Sposobu kontroli właściwości mechanicznych oraz deformacji elastycznych w mechanicznych metamateriałach,.. Chciałbym zaznaczyć metamateriały jest najnowszą generacją materiałów dających funkcjonalne zastosowania.

Rozprawa habilitacyjna dr Krzysztofa Karola Dudka składa się z cyklu dziewięciu publikacji oraz kilkostronicowego opracowania w języku polskim. Opracowanie to zawiera listę publikacji, opis metodologię badań, omówienie poszczególnych prac oraz podsumowanie otrzymanych wyników. Napisane jest zwięźle i rzeczowo oraz stanowi dobry opis samych publikacji. Publikacje ukazały się w latach 2019 – 2023 w bardzo dobrych czasopismach: dwie *Adv. Mater.* **34**, 2110115 (2022) i *Adv. Mater.* **35**, 2210993 (2023) $IF_{2023} = 29.400$, punkty $MNSiW_{2023} = 200$; cztery prace *Int. J. Solids Struct.* **191-192**, 212-219 (2020), $IF_{2020} = 3.900$, punkty, *Mater. Des.* **187**, 108403 (2020) $IF_{2020} = 7.991$, *Sci. Rep.* **9**, 3963 (2019) $IF_{2019} = 3.998$, *Mater. Des.* **226**, 111596 (2023) $IF_{2023} = 8.400$, punkty $MNSiW_{2019} = 140$; dwie prace *Smart Mater. Struct.* **29**, 115027 (2020), $IF_{2020} = 3.585$, *Proc. R. Soc. A.* **477**, 20200825 (2021) $IF_{2021} = 3.213$, punkty $MNSiW_{2021} = 100$; jedną pracę *Phys. Status Solidi B* **259**, 2200404 (2022) $IF_{2022} = 1.600$, punkty $MNSiW_{2022} = 70$. Jedna publikacja samodzielna. Wkład w powstanie prac w większości polegał na: Zaproponowanie problem badawczy opisany w tej pracy. Dodatkowo odpowiadał za wygenerowanie oraz wstępną interpretację wszystkich wyników. Do obowiązków należało również napisanie artykułów oraz prezentacja wyników w formie graficznej. Pełnił w większości prac rolę autora korespondującego. Prace te pokazują w spójny różne metody osiągnięcia kontroli nad właściwościami mechanicznymi oraz deformacjami elastycznymi mechanicznych metamateriałów.

Badania zaprezentowane w cyklu prac H1-H9 były w głównej mierze oparte na symulacjach komputerowych oraz eksperymentach. Jednak w przypadku niektórych z prac wykorzystane zostały dodatkowo modele analityczne. Dobrym tego przykładem są modele analityczne pozwalające na obliczenie współczynnika Poissona w przypadku prac H1 oraz H7. Dodatkowo w przypadku pracy H7 przedstawiony został model analityczny pozwalający na oszacowanie energii potencjalnej badanego układu magneto-mechanicznego. W tym celu zastało założone, że zachowanie realistycznych wkładów magnetycznych w postaci magnesów może być przybliżone poprzez sieć stworzoną z indywidualnych dipolowych momentów magnetycznych które wypełniały przestrzeń odpowiadającą kształtowi magnesów.

Eksperymenty dotyczące głównego osiągnięcia naukowego (tzn. cyklu prac H1-H9) związane były w całości z wydrukami 3D za pomocą różnych technik. W pracach H3 oraz H9 niektóre z badanych metamateriałów miały rozmiary makroskopowe odpowiadające komórce elementarnej mającej wymiary rzędu kilkudziesięciu milimetrów. W tych przypadkach badane próbki zostały wyprodukowane za pomocą drukarki filamentowej (FDM) oraz drukarki żywicznej (SLA) pozwalającej na wydruk z wykorzystaniem bardzo elastycznych materiałów. W przypadkach prac H1, H5 oraz H9 badania dotyczyły również układów w mikroskali. W tych przypadkach, metamateriały zostały wydrukowane za pomocą techniki dwufotonowej litografii gdzie dokładność wydruku sięgała około 1000 nm przy wybranej żywicy. Metoda ta pozwoliła na wydruk prototypów o niezwykle małych rozmiarach które często nie były widoczne dla ludzkiego oka bez wykorzystania mikroskopu.

W prawie wszystkich pracach wchodzących w skład głównego osiągnięcia naukowego, zachowanie wyprodukowanych prototypów było testowane przy pomocy maszyny wytrzymałościowej (zintegrowanej z kamerą) pozwalającej na rozciąganie lub ściskanie badanych próbek oraz nagrywanie procesu deformacji.

Głównym celem łączącym wszystkie prace z cyklu artykułów H1-H9 jest pokazanie różnych sposobów osiągnięcia kontroli nad nietypowymi właściwościami mechanicznymi metamateriałów lub kontroli nad ich elastyczną deformacją. Jednym ze sposobów pozwalających na osiągnięcie tego celu który został wykorzystany w pracy H1 jest zaprojektowanie układów o strukturze kompozytowej / wielopoziomowej.

Dobrym tego przykładem jest praca H2 gdzie przy pomocy zmiany w rozkładzie masy wewnątrz układu możliwe jest wywołanie jego globalnej rotacji jedynie na skutek wewnętrznej deformacji. Jest to efekt który w dziedzinie mechanicznych metamateriałów został po raz pierwszy opisany w jego pracach.

Spośród analizowanych struktur największy zakres globalnej rotacji może być zaobserwowany dla układu chiralnego. W związku z tym istotne jest potwierdzenie możliwości obserwacji badanego efektu w przypadku eksperymentów. Zadanie to było głównym celem postawionym przy realizacji zadań badawczych opisanych w artykule H3.

Prace H2 oraz H3 dotyczyły możliwości kontroli globalnej rotacji w przypadku metamateriałów dwuwymiarowych. Pojawia się jednak pytanie czy podobny efekt może być również zaobserwowany w przypadku bardziej skomplikowanych układów w 3D. Głównym celem pracy H4 była weryfikacja takiej możliwości.

W pracach H1-H4 zaprezentowano możliwość zmiany właściwości mechanicznych układu lub jego procesu deformacji w wyniku wyraźnej przebudowy układu polegającej na zmianie kompozytowej struktury układu albo jego rozkładu masy. Możliwe jest jednak również znalezienie mechanicznych metamateriałów gdzie niezwykle niewielka zmiana w zaprojektowanej strukturze spowoduje znaczną różnicę w jego właściwościach mechanicznych takich jak współczynnik Poissona.

Odpowiedzią na wszystkie te wyzwania związane ze współczesnymi układami hierarchicznymi była praca H5 opublikowana w czasopiśmie *Advanced Materials*.

Głównym celem poprzedniej pracy cyklu (H5) było pokazanie możliwości osiągnięcia znacznej zmiany w statycznych właściwościach układu takich jak jego współczynnik Poissona jedynie na skutek bardzo niewielkiej zmiany w strukturze początkowej układu związanej z grubością zawiasów. podobny sposób układy hierarchiczne mogą zostać użyte aby kontrolować własności dynamiczne układu. Aby to udowodnić, praca H6 była poświęcona analizie zmian jakie zachodzą w fononicznej strukturze pasmowej układu na skutek niewielkiej zmiany w grubości zawiasów układu hierarchicznego.

W pracy H7, poza możliwością kontroli właściwości mechanicznych układu, poruszony został również inny kluczowy temat z punktu widzenia tej dziedziny. Zagadnienie to dotyczy możliwości zaprojektowania mechanicznych metamateriałów w sposób który pozwala na równoczesną obserwację kilku nietypowych właściwości mechanicznych. Szczególnie interesujące było sprawdzenie możliwości zaprojektowania układu będącego w stanie równocześnie przejawiać zachowanie auksetyczne i ujemną sztywność co wynikało z możliwych zastosowań tego typu struktur. Badany metamateriał może przejawiać dodatni lub ujemny współczynnik Poissona w zależności od fazy deformacji. W zależności od orientacji magnesów neodymowych wewnątrz struktury, badany metamateriał może przejawiać dodatnią (odpychające się magnesy) lub ujemną sztywność (przyciągające się magnesy). Oznacza to, że bez konieczności przebudowy układu, możliwa jest kontrola zarówno nad współczynnikiem Poissona układu jak i jego sztywnością. **Przy odpowiedniej orientacji magnesów, badany układ może równocześnie przejawiać zarówno zachowanie auksetyczne jak i ujemną sztywność. Był to pierwszy artykuł gdzie możliwość taka została zademonstrowana dla trójwymiarowego magnetomechanicznego metamateriału.**

W pracy H8, pokazano wpływ jaki wkłady magnetyczne wewnątrz układu mogą mieć na absorpcję energii związaną ze zderzeniem danego metamateriału z ciałem zewnętrznym. Głównym celem artykułu było zaprojektowanie magneto-mechanicznego modelu który pozwoliłby na minimalizację siły doświadczanej przez obiekt chroniony przez warstwę badanego metamateriału w trakcie jego kolizji z ciałem zewnętrznym poruszającym się ze znaczną prędkością. Wystarczy zastąpić standardowe magnesy poprzez elektromagnesy w których wypadkowy magnetyczny moment dipolowy mógłby być kontrolowany poprzez dostarczany prąd.

W pracach H7 oraz H8 pokazano jak wkłady magnetyczne mogą zostać wykorzystane wewnątrz mechanicznego metamateriału aby móc kontrolować jego zachowanie bez konieczności przebudowy systemu. W pracach tych oddziaływania magnetyczne ograniczone były jednak do wzajemnych interakcji pomiędzy wkładami magnetycznymi. Jednak z punktu widzenia możliwych zastosowań bardzo ciekawa jest również możliwość kontroli właściwości mechanicznych struktury poprzez zmianę w zewnętrznym polu magnetycznym. Jest to obecnie jeden z najbardziej istotnych kierunków badań w dziedzinie mechanicznych metamateriałów. Ten kierunek badań jest szczególnie ważny w przypadku nowoczesnej mikrorobotyki wykorzystującej wielofunkcyjne metamateriały. W tym celu, należy skonstruować aktywne układy w skali mikro oraz zaprojektować je w sposób umożliwiający na przejawienie kilku nietypowych właściwości mechanicznych w tym samym czasie. Zadanie to jest z pewnością dużym wyzwaniem ale praca H9 opublikowana w czasopiśmie *Advanced Materials* pokazuje, że jest ono możliwe do skutecznej realizacji.

Podsumowując, uważam, że rozprawa habilitacyjna doktora dr Krzysztofa Karola Dudka „Sposobu kontroli właściwości mechanicznych oraz deformacji elastycznych w mechanicznych metamateriałach”, zawiera interesujące nowe i ważne wyniki oraz spełnia ustawowe i zwyczajowe wymagania stawiane rozprawom habilitacyjnym.



Prof. dr hab. Niko Guskos
Katedra Fizyki Stosowanej
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie