



Konstantin V. Tretiakov  
**Instytut Fizyki Molekularnej  
Polskiej Akademii Nauk**

Mariana Smoluchowskiego 17, 60-179 Poznań  
tel. 61 8695 276, fax 61 8684-524  
tretiakov@ifmpan.poznan.pl

Poznań, 22.02.2024

Ocena dorobku naukowego i cyklu prac naukowych pod tytułem  
*„Sposoby kontroli właściwości mechanicznych oraz deformacji  
elastycznych w mechanicznych metamateriałach”*

dra Krzysztofa Dudka

Dr Krzysztof Karol Dudek odbył studia na Wydziale Fizyki i Astronomii Uniwersytetu Zielonogórskiego i w roku 2016 uzyskał tytuł magistra fizyki. Dwa lata później w roku 2018 na Uniwersytecie na Malcie (University of Malta), uzyskał On stopień doktora (PhD) za rozprawę doktorską pt. *„Properties of mechanical metamaterials with the focus on magnetic inclusions”*. Promotorem rozprawy był profesor Joseph N. Grima wybitny specjalista w dziedzinie auksetyków i mechanicznych metamateriałów. W tymże roku po uzyskaniu stopnia doktora rozpoczął On pracę na stanowisku adiunkta na Wydziale Fizyki i Astronomii Uniwersytetu Zielonogórskiego, gdzie pracuje w chwili obecnej. Po uzyskaniu stopnia doktora dr Krzysztof Dudek odbył kilka staży podoktorskich w Instytut FEMTO-ST (CNRS) w Besançon (Francja) w grupie profesora Muamera Kadica, które łącznie trwały ponad rok. Oprócz tego w roku 2023 przez dwa miesiące pracował na stanowisku zaproszonego profesora (Invited Professor) w École Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques również w Besançon (Francja).

**Ocena osiągnięć naukowych stanowiących podstawę do uzyskania stopnia doktora habilitowanego**

W ciągu pięciu lat po uzyskaniu stopnia doktora, dr Krzysztof Dudek opublikował 20 prac w renomowanych czasopismach naukowych. Jako podstawę postępowania habilitacyjnego, dr Krzysztof Dudek przedstawił do oceny cykl prac naukowych pod tytułem „Sposoby kontroli właściwości mechanicznych oraz deformacji elastycznych w mechanicznych metamateriałach” składający się z 9 publikacji, wśród których 2 publikacje (H5, H9) ukazały się w topowym czasopiśmie *Advanced Materials* (IF=29.4), a inne w takich renomowanych czasopismach, jak *Materials & Design* (H7), *Composite Structures* (H1), *Scientific Reports* (H8), *Smart Materials and Structures* (H3), *International Journal of Solids and Structures* (H2), *Proceedings of The Royal Society A* (H4), *Physica Status Solidi B* (H6) (z IF w przedziale pomiędzy 1.6 i 8.4). Praca H3 jest autorskim osiągnięciem dra Krzysztofa Dudka. Pozostałe prace to są publikacje wieloautorskie i powstały we współpracy z grupą profesora M. Kadica i grupą profesora J.N. Grimy. We wszystkich tych pracach habilitant jest pierwszym autorem i autorem korespondencyjnym, co łącznie z oświadczeniami współautorów świadczy o jego wiodącej roli w tych badaniach oraz znaczącym indywidualnym wkładzie. Z oświadczenia habilitanta

wynika, że we wszystkich pracach był on pomysłodawcą badań oraz wykonał większość obliczeń numerycznych, a także brał aktywny udział części eksperymentalnej badań.

Cykl prac jest poświęcony zagadnieniu kontroli własności mechanicznych i deformacji sprężystych w mechanicznych metamateriałach. Mechaniczne metamateriały są to układy wykazujące nietypowe właściwości mechaniczne (na przykład własności auksetyczne, czy ujemną sztywność), które determinowane przede wszystkim przez morfologię struktury, a w mniejszym stopniu przez ich skład chemiczny czy fazowy. W ostatnich latach badaniom takich układów i poszukiwaniu nowych metamateriałów poświęca się coraz większą uwagę. Jest to zagadnienie aktualne i ważne z powodu możliwości aplikacyjnych, a ponadto bardzo interesujące z poznawczego punktu widzenia. Tematyka habilitacji dotyczy możliwości kontroli własności mechanicznych metamateriałów poprzez użycie konstrukcji kompozytowej (H1), modyfikacji rozkładu masy wewnątrz układu (H2-H4), wykorzystanie hierarchiczności struktury (H5-H6) i wykorzystanie zewnętrznego pola magnetycznego w przypadku magneto-mechanicznych metamateriałów (H7-H9).

Praca H1, opublikowana w *Composite Structures*, jest poświęcona zbadaniu możliwości zmiany współczynnika Poissona układu w bardzo szerokim zakresie jego wartości od dodatnich po ujemne (auketyczne). Zmiany te są związane z kompozytową strukturą metamateriału bazującej na strukturach tak zwanych „rotujących kwadratów” i „rotujących trójkątów”. Efekt uzyskano poprzez odpowiednie nowatorskie zaprojektowanie struktury oraz składu poszczególnych struktur w kompozytowym metamateriale. Dodatkowo obliczono propagację fal w badanych strukturach i wykazano znaczące różnice w ich prędkości grupowej. Uzyskane wartości współczynnika Poissona badanych kompozytowych metamateriałów odpowiadają wartościom pośrednim dla struktur „rotujących kwadratów” i „rotujących trójkątów”, co nie jest zaskakujące. Warto podkreślić dobrą zgodność wyników eksperymentalnych i obliczeń wykonanych metodą elementów skończonych.

W pracach H2-H4 pokazano, że za pomocą zmiany w rozkładzie masy wewnątrz układu, możliwe jest wywołanie jego globalnej rotacji wskutek wewnętrznej deformacji. Efekt ten bazuje na niezerowym wypadkowym momencie pędu. Symulacje komputerowe metodą Dynamiki Molekularnej opisane w pracy H2 wskazały, że badane dwuwymiarowe metamateriały mechaniczne o dyskretnym rozkładzie masy, mogą indukować własny globalny ruch obrotowy w wyniku odkształcenia wewnętrznego. Natomiast, zakres tej rotacji można kontrolować poprzez zmianę rozkładu masy i parametrów geometrycznych układu. Pokazano również, że struktura heksachiralna wykazuje największy stopień globalnej rotacji, wśród badanych w tej pracy struktur metamateriałów mechanicznych. W autorskiej pracy H3, habilitant podjął się eksperymentalnego potwierdzenia wyników pracy H2, a mianowicie faktu, że największy zakres globalnej rotacji może być zaobserwowany dla układu chiralnego. W tym celu opracował i przygotował (za pomocą drukarki 3D typu FDM) prototypy trzech układów opartych na strukturach chiralnych. W pracy tej, dr Krzysztof Dudek potwierdził eksperymentalnie, a także za pomocą symulacji komputerowych metodą Dynamiki Molekularnej, możliwość obserwacji zjawiska globalnej rotacji, wywołanej przez wewnętrzną deformację w przypadku struktur chiralnych. W pracy H4 o charakterze teoretyczno-symulacyjnym, zaprezentowano trójwymiarowe układy, które mogą indukować globalny ruch obrotowy, a zakres takiego obrotu można kontrolować poprzez zmianę rozkładu masy w układzie. Oprócz tego w pracy tej, przedstawiono ciekawy koncept układu z elektromagnesami i magnesami poruszającymi się po sztywnych prętach. Ta koncepcja pozwala na programowalną kontrolę nad ruchem obrotowym konstrukcji. Jest to ciekawy i ważny rezultat.

Metamateriały o strukturze hierarchicznej stanowiły przedmiot prac H5 i H6. W pracy H5, opublikowanej w *Advanced Materials*, zaprezentowano nowe metamateriały mechaniczne o dwupoziomowej strukturze hierarchicznej, zarówno w dwóch jak i w trzech wymiarach. Należy podkreślić, że zaprezentowane próbki są mikrometrowych rozmiarów, które praktycznie nie są widzialne bez mikroskopu. Natomiast kontrola struktury, za pomocą techniki opartej o metodę litografii dwufotonowej, pozwoliła na bardzo subtelne zmiany w grubości łącz elementów różnych poziomów struktury. Właśnie te zmiany odpowiadają za uruchomienie mechanizmów sprężystych na poszczególnych poziomach struktur i w konsekwencji prowadzą do szerokiego zakresu ujemnych wartości współczynnika Poissona. Poza tym, w pracy H5 pokazano bardzo ciekawe możliwości manipulacji kształtem próbki, a mianowicie umożliwienie odtworzenia kształtu obiektu referencyjnego, poprzez subtelne zmiany grubości łącz elementów struktury dwupoziomowej hierarchicznej. Niewątpliwie, ta praca zainspiruje wielu badaczy do pojęcia tej tematyki. Praca H6 ma charakter teoretyczno-symulacyjny. W tej pracy, stosując ideę przedstawianą w H5, potwierdzono możliwości zmian własności auksetycznych struktur hierarchicznych, a poza tym wskazano na możliwości uzyskania dużych zmian relacji dyspersyjnych fononowych. Wykazano, że bardzo mała zmiana grubości łącz elementów struktury dwupoziomowej hierarchicznej, może prowadzić do powstania przerwy energetycznej w strukturze pasmowej i utworzenia pasma wzbronionego w pewnym zakresie częstotliwości. Z pewnością ten efekt może mieć ciekawe zastosowania praktyczne.

Ostatnie trzy prace cyklu (H7, H8 i H9) są poświęcone magneto-mechanicznym układom i metamateriałom. W pracy H7, opublikowanej w *Materials and Design*, jest rozważany układ magneto-mechaniczny, który może przejawiać równocześnie kilka nietypowych właściwości mechanicznych, a mianowicie zachowanie auksetyczne i ujemną sztywność. Testowany eksperymentalnie układ trudno nazwać metamateriałem, ponieważ jest to po prostu układ magneto-mechaniczny. Niemniej jednak, obliczenia dla modelu teoretycznego składającego się z 3x3x3 komórek elementarnych badanej eksperymentalnie struktury, prowadzą do podobnych wyników jak i dla układu magneto-mechanicznego. W związku z powyższym, jest to ciekawa propozycja prototypu magneto-mechanicznego metamateriału, który może jednocześnie wykazywać kilka nietypowych właściwości mechanicznych. Inną interesującą koncepcję magneto-mechanicznego metamateriału, zaprezentowano w pracy H8 opublikowanej w *Scientific Reports*. Za pomocą symulacji komputerowych metodą Dynamiki Molekularnej, wskazano na możliwość redukcji siły uderzeniowej, poprzez odpowiednie zaprojektowanie kompozytowego metamateriału z inkluzjami magnetycznymi. Ważnym aspektem tych badań był odpowiedni rozkład wstawek magnetycznych. Pokazano również, że mechaniczne metamateriały z wtrąceniami magnetycznymi, mogą wykazywać zwiększoną odporność na uderzenia w porównaniu do ich niemagnetycznych odpowiedników. Wyniki tych badań mogą mieć istotne znaczenie aplikacyjne. Zamyka cykl praca H9 z *Advanced Materials*. Jest to bardzo ważna praca pokazująca możliwość realizacji tak zwanego „aktywnego” mechanicznego metamateriału (ang. *active mechanical metamaterial*), który może wykazywać różne jakościowo własności mechaniczne pod wpływem bodźców zewnętrznych, na przykład pola magnetycznego w tym przypadku. W szczególności wykazano, że rozważana konstrukcja może zrealizować przejście od dodatniego do silnie ujemnego współczynnika Poissona wyłącznie w wyniku procesu rekonfiguracji, który można wywołać i sterować nim zdalnie poprzez zewnętrzne pole magnetyczne. Innym ciekawym rezultatem tej pracy jest propozycja nowego metamateriału mechanicznego w mikroskali, który w zależności od jego struktury ma ujemny współczynnik Poissona, odpowiadający silnej auksetyczności lub ma wysoce dodatni współczynnik Poissona. Warto podkreślić, że zmieniając parametry struktury, można również

kontrolować powstawanie i szerokość przerw energetycznych w spektrum fononowym, co jak już wspomniano powyżej może być bardzo przydatne w praktyce.

Chciałbym podkreślić spójny i dobrze przemyślany wybór prac stanowiących osiągnięcie naukowe. Podsumowując, cykl prac naukowych przedstawiających badania sposobów kontroli właściwości mechanicznych oraz deformacji elastycznych w mechanicznych metamateriałach oceniam jako znaczący wkład w rozwój dyscypliny naukowej. W mojej opinii, przedstawiony cykl prac stanowiący wspomniane wyżej osiągnięcie naukowe w pełni kwalifikuje dra Krzysztofa Dudka do nadania stopnia doktora habilitowanego.

### **Ocena dorobku naukowego, organizacyjnego i dydaktycznego**

Dr Krzysztof Dudek jest autorem i współautorem 34 publikacji naukowych, z czego 20 prac ukazało się po uzyskaniu stopnia doktora. Większość tych prac opublikowano w bardzo dobrych i topowych czasopismach, wystarczy wymienić 2 prace w *Advanced Materials* (IF=29.4), 1 praca w *Advanced Science* (IF=15.1), 2 prace w *Materials & Design* (IF=8.4), 2 prace w *Composite Structures* (IF=6.3), 3 prace w *Scientific Reports* (IF=4.6), 4 prace w *Smart Materials and Structures* (IF=4.1). Prace habilitanta były cytowane około 500 razy bez autocytowań, a jego H-index wynosi 14 (wd. bazy *Web of Science*). W tym miejscu należy podkreślić, że praca H5 opublikowana w 2022 roku w *Advanced Materials* ma już 53 cytowania, a praca H7 (*Materials & Design*) ma 51 cytowań (w momencie pisania recenzji), to również świadczy o wysokiej wartości i aktualności badań habilitanta. Dr Krzysztof Dudek wyniki swoich badań prezentował 12 razy na konferencjach krajowych i międzynarodowych, w tym 2 wykłady na zaproszenie, wystąpienia w postaci plakatów habilitant pominał i nie zawarł w przedłożonej dokumentacji. Oprócz tego, brał On aktywny udział w organizacji 3 konferencji, pełniąc dwukrotnie rolę członka komitetu organizacyjnego i jeden raz rolę sekretarza. Na osobną uwagę zasługuje realizacja przez habilitanta projektów badawczych finansowanych w drodze konkursów. Dr Krzysztof Dudek był 4 razy kierownikiem projektów badawczych finansowanych przez NCN (3 projekty) i Fundację na rzecz Nauki Polskiej (1 projekt). To świadczy o wysokiej samodzielności habilitanta zarówno w kwestii pozyskiwania środków na badania, jak i prowadzeniu badań. Należy również podkreślić szeroką międzynarodową współpracę naukową, którą prowadzi habilitant. Odbił On kilka zagranicznych staży podoktorskich (FEMTO-ST, CNRS, Francja) i przez 2 miesiące pracował na stanowisku zaproszonego profesora we Francji (École Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques). Chciałbym podkreślić, że habilitant jest recenzentem w bardzo dobrych czasopismach międzynarodowych i do tej pory zrecenzował 20 prac, w tym po 2 prace w *Advanced Materials* i *Materials & Design*, oraz 1 pracę dla *Advanced Science*. Dr Krzysztof Dudek ma też doświadczenie dydaktyczne, pomimo tego, że w latach 2021-2023 pracował na etacie naukowym w związku z realizacją grantu NCN. Prowadził On zajęcia dydaktyczne w języku polskim i angielskim na Uniwersytecie Zielonogórskim we wszystkich formach dydaktycznych poczynając od ćwiczeń z fizyki (mechanika, elektryczność i magnetyzm, elektrodynamika, fizyka statystyczna w zastosowaniach), laboratoria (modelowanie i symulacje układów fizycznych, wstęp do symulacji komputerowych, i inne), aż po wykłady z Metod Numerycznych i Symulacji Układów Kwantowych. Był On również promotorem jednej pracy licencjackiej i magisterskiej, oraz pomagał w prowadzeniu studentów studiów doktoranckich. Poza tym, brał udział w popularyzacji nauki występując w roli opiekuna studenckiego koła naukowego "PiN" w latach 2018-2020 oraz wygłosił liczne wykłady promocyjne i popularyzatorskie w szkołach w województwie lubuskim. Habilitant pełnił również rolę członka wydziałowej komisji rekrutacyjnej do oceny kompetencji językowych

studentów i jest członkiem Rady Dyscypliny. Moim zdaniem, pomimo stosunkowo krótkiej kariery naukowej, liczącej 7 lat od momentu ukończenia studiów wyższych i rozpoczęcia doktoratu w roku 2016, habilitant z nadmiarem spełnia wszystkie ustawowe i zwyczajowe wymagania stawiane habilitacjom we wszystkich aspektach: naukowym, organizacyjnym i dydaktycznym.

### **Wniosek końcowy**

Dorobek naukowy dra Krzysztofa Dudka oceniam bardzo wysoko i uważam, że cykl prac badawczych, jak i jego inne prace naukowe stanowią znaczący wkład w rozwój dyscypliny. Moim zdaniem osiągnął On samodzielność i znaczną dojrzałość naukową.

**Stwierdzam, że dr Krzysztof Karol Dudek spełnia warunki do uzyskania stopnia doktora habilitowanego określone w Ustawie. W związku z tym popieram wniosek o nadania Mu stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne.**

Z poważaniem



dr hab. inż. Konstantin V. Tretiakov