



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Chemii



Warszawa, 8 marca 2024

Dr hab. Andrzej Sikorski, prof. ucz.
Pracownia Teorii Biopolimerów
Wydział Chemii
Uniwersytet Warszawski
ul. Pasteura 1, 02-093 Warszawa
mail: sikorski@chem.uw.edu.pl
tel.: 22 552 6366

**Ocena dorobku naukowego i osiągnięciu naukowego „Sposoby kontroli
właściwości mechanicznych oraz deformacji elastycznych
w mechanicznych metamateriałach” dra Krzysztofa Karola Dudka
w ramach postępowania habilitacyjnego**

Pan dr Karol Krzysztof Dudek jest absolwentem Uniwersytetu Zielonogórskiego, gdzie ukończył studia w 2016 r. uzyskując stopień magistra na Wydziale Fizyki i Astronomii w oparciu o pracę „The kinetic Monte Carlo simulation of the proton conductivity in a one-dimensional chain of tetrahedral molecules”. Warto odnotować, że dr Dudek w czasie studiów odbył w Uniwersytecie Maltańskim (*University of Malta*) 2 staże studenckie w ramach programu Erasmus (3 miesiące oraz 1 semestr). Stopień doktora uzyskał w 2018 r. na podstawie pracy „Properties of mechanical metamaterials with the focus on magnetic inclusions” wykonanej pod kierunkiem prof. Josepha N. Grima w Uniwersytecie Maltańskim na Wydziale Nauki (*Faculty of Science*); drugim promotorem tej pracy był prof. Krzysztof W. Wojciechowski z Instytutu Fizyki Molekularnej PAN w Poznaniu. Tematyka pracy doktorskiej dotyczyła badań metamateriałów metodami doświadczalnymi i teoretycznymi. W 2017-2018 dr Dudek odbył 9-miesięczny staż doktorancki w Instytucie Fizyki Molekularnej PAN w Poznaniu, a od 2018 r. jest adiunktem w grupie prof. Andrzeja Drzewińskiego w Zakładzie Modelowania Procesów Fizyko-Chemicznych, w Wydziale Fizyki i Astronomii Uniwersytetu Zielonogórskiego, gdzie kontynuuje prace nad metamateriałami. Po

uzyskaniu stopnia doktora odbył 3 krótkoterminowe staże podoktorskie w grupie prof. Muamera Kadica w Instytucie FEMTO-ST (CNRS) w Besancon (Francja), trwające odpowiednio 2, 6 i 4 miesiące w latach 2021, 2022 i 2023. Staże te były poświęcone badaniom metemateriałów mechanicznych i zakończyły się opublikowaniem 5 bardzo wartościowych publikacji. Czwarty, 2-miesięczny pobyt, na stanowisku profesora wizytującego dr Dudek odbył w Narodowej Szkole Wyższej Mechaniki i Mikrotechniki (*École Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques*) w Besancon.

Dorobek naukowy dra Karola Dudka obejmuje w sumie 34 publikacji naukowych, opublikowanych w recenzowanych czasopismach naukowych. Z tej liczby 14 artykułów zostało opublikowanych przed otrzymaniem stopnia doktora. Trzeba podkreślić, że wszystkie te artykuły znalazły się w recenzowanych i renomowanych czasopismach o zasięgu międzynarodowym, o bardzo wysokim czynniku wpływu, a także w tych uważanych za prestiżowe, na przykład *Advanced Materials* czy *Advanced Science*. Sumaryczny czynnik wpływu (*Impact Factor*) tych prac wyniósł $IF = 178$, co oznacza średnio ok. 5,2 na publikację, co jest bardzo dobrym wynikiem. Uwzględniając tylko prace opublikowane po uzyskaniu doktoratu, gdzie $IF = 148$, średni czynnik wpływu wygląda jeszcze lepiej (średnio ok. 8,9 na publikację). Należy to uznać za wybitne osiągnięcie, choć trzeba też dodać, że w dużym stopniu za wysoką wartość tej średniej odpowiadają 2 publikacje, a bez ich uwzględnienia wynosi ona tylko 4,2 ogółem i 5,2 po doktoracie, co wciąż jest bardzo dobrym wynikiem. Dr Dudek ma więc znaczący dorobek naukowy i cieszy się on uznaniem środowiska naukowego, o czym świadczy liczba cytowań jego prac przez innych autorów (593/629/761, odpowiednio według Web of Science, Scopus i Google Scholar), a po pominięciu autocytowań – 504 cytowania. Oznacza to średnio 14,8 na jedną publikację, co trzeba uznać za wybitne osiągnięcie, zważywszy, że wszystkie te publikacje powstały tylko w ciągu ostatnich 10 lat. Zwrócić też należy uwagę na relatywnie wysoki wskaźnik Hirscha ($H = 14/15/17$, Web of Science/Scopus/Google Scholar), a więc obejmujący między 40 a 50% wszystkich prac Autora. Brak jest natomiast wśród publikacji Autora prac

przeglądowych oraz monografii naukowych czy rozdziałów w takich monografiach; takie publikacje na tym etapie rozwoju naukowego są jednak zdecydowanie wskazane. Wśród osiągnięć dra Dudka nie widać także wynalazków/patentów. Wyniki swoich badań dr Dudek zaprezentował także na 12 międzynarodowych konferencjach naukowych. Trzeba odnotować, że dwa z tych wystąpień były wykładami na zaproszenie, ale co do pozostałych nie wiadomo, czy były to komunikaty czy też referaty (w swoim wykazie osiągnięć naukowych dr Dudek pominął plakaty prezentowane na konferencjach). Zauważmy jeszcze, że w dorobku Autora nie widać recenzji prac publikowanych w czasopismach naukowych.

Trzeba także podkreślić aktywność dra Dudka w pozyskiwaniu środków finansowych na prowadzenie działalności badawczej i udział w fundowanych projektach. Był on bowiem kierownikiem grantu Narodowego Centrum Nauki w konkursie Miniatura 4, a obecnie jest kierownikiem dwóch projektów NCN w trakcie realizacji: otrzymanym w konkursie Sonata 5, a także w konkursie Sonatina 18. Trzeba zauważyć, że wszystkie te projekty były jednoosobowe i w związku z tym nie przyczyniły się do tworzenia zespołu badawczego i kierowania nim. Dr Dudek uzyskał także stypendium Fundacji nauki Polskiej w konkursie Start.

Dr Dudek ma też doświadczenie i osiągnięcia w działalności dydaktycznej. W Uniwersytecie Zielonogórskim prowadził różnorodne zajęcia, w tym wykłady z metod numerycznych i z symulacji układów kwantowych, a także laboratoria (modelowanie i symulacja układów fizycznych, języki skryptowe w analizie danych, symulacje układów kwantowych, wstęp do symulacji komputerowych, pracownia fizyczna) i ćwiczenia (podstawy fizyki, elektrodynamika, fizyka środowiska). Podkreślić trzeba, że część tych zajęć była prowadzona w języku angielskim. Ponadto pod opieką Autora wykonano 1 pracę magisterską w Uniwersytecie Zielonogórskim oraz 1 pracę licencjacką w Uniwersytecie Franche-Comté (Autor pełnił tu funkcję promotora pomocniczego). Wspomnieć wreszcie trzeba o udziale dra Dudka w popularyzowaniu nauki wśród studentów Uniwersytetu Zielonogórskiego i Uniwersytetu Maltańskiego oraz wśród

uczniów szkół w Lubuskim. Do działalności organizatorskiej zaliczyć należy współorganizowanie 3 międzynarodowych konferencji naukowych oraz członkostwo w Radzie Dyscypliny w Uniwersytecie Zielonogórskim. Nie widać jednak, by dr Dudek gromadził wokół siebie młodych naukowców i organizował zespół badawczy.

Autor ze swoich prac, powstałych po uzyskaniu stopnia doktora, wybrał 9 i przedstawił je w autoreferacie jako osiągnięcie naukowe „Sposoby kontroli właściwości mechanicznych oraz deformacji elastycznych w mechanicznych metamateriałach”. Wszystkie prace składające się na oceniane osiągnięcie naukowe charakteryzują się bardzo wysoką, sumaryczną wartością czynnika wpływu (*Impact Factor*) $IF = 89$. Wysoka jest więc także średnia przypadająca na publikację (ok. 10). Autor nie podaje informacji o liczbie cytowań prac wchodzących w skład osiągnięcia naukowego; można jednak ustalić, że według Web of Science do chwili obecnej (marzec 2024 r.) były one cytowane 208 razy (190 razy bez autocytowań). Ten wynik trzeba nazwać imponującym, zważywszy, że wszystkie 9 prac zostało opublikowane stosunkowo niedawno, a mianowicie w latach 2019-2023. Podkreślimy jeszcze, że dwie z tych prac były cytowane ponad 50 razy każda. Dr Dudek był w jednej pracy autorem samodzielnym, a pozostałe publikacje mają charakter prac wieloautorskich (od 3 do 9 autorów). We wszystkich pracach dr Dudek był pierwszym autorem, a także pełnił rolę autora korespondującego, co zwykle oznacza większościowy wkład. Nie ulega wątpliwości, że jego wkład do tych prac jest najważniejszy. Świadczą o tym zarówno stosowne oświadczenia współautorów tych artykułów, jak i komplementarne do nich oświadczenia samego dra Dudka. Podsumowując, udział Autora był koncepcyjny, bowiem polegał przede wszystkim na sformułowaniu problemów badawczych i zaplanowaniu badań, co wskazuje na jego dobre przygotowanie do kolejnych faz rozwoju naukowego. Poza tym dr Dudek nadzorował badania, zarówno doświadczalne, jak i symulacyjne, częściowo analizował dane oraz pisał i przygotowywał do druku artykuły z wynikami owych badań.

Wszystkie prace składające się na rozprawę (H1-H9) dotyczą badania metamateriałów, a więc sztucznych, niewystępujących w przyrodzie struktur, które wykazują anomalne właściwości mechaniczne, nie wynikające jednak ze struktury na poziomie molekularnym, a z geometrii tworzących je podjednostek. Metamateriały mechaniczne charakteryzują się niezwykleymi właściwościami mechanicznymi, np. ujemnym współczynnikiem Poissona czy też ujemną sztywnością. Takie metamateriały można zaprojektować i zbudować, a warto je badać ze względu na liczne potencjalne zastosowania w inżynierii materiałowej (np. warstwy ochronne - materiały gęstnieją lokalnie po uderzeniu), biomedycynie (np. stenty), w robotyce, kosmonautyce (satelity, teleskopy stosowane w kosmosie, statki kosmiczne) czy sporcie. Do produkcji tych układów można używać techniki druku 3D czy cięcia femtosekundowym laserem. Metamateriały mogą zyskać dodatkowe właściwości dzięki osadzeniu w ich strukturze innego materiału, na przykład nanoczątek magnetycznych, co pozwala na uzyskanie dodatkowych ciekawych właściwości. W przedstawionych pracach dr Dudek badał przede wszystkim metamateriały, które charakteryzowały się ujemnym współczynnikiem Poissona. Omawiane osiągnięcie naukowe jest więc rozszerzeniem prac prowadzonych wcześniej przez dra Dudka, zwłaszcza w rozprawie doktorskiej. Rozszerzeniem nie tylko ze względu na wprowadzenie modeli nowych metamateriałów, nowych koncepcji ich konstruowania, ale także wprowadzenia znacznie szerszego wachlarza metod badawczych.

W pracy H1 Autor badał nowe metamateriały prawie dwuwymiarowe i trójwymiarowe zbudowane z 2 różnych podstruktur o różnych współczynnikach Poissona, wykonanych za pomocą druku 3D. Oprócz badania doświadczalnego metamateriałów, ich właściwości zbadano za pomocą symulacji komputerowych metodą elementów skończonych. Pokazano, że można zaprojektować metamateriał o pożądanym współczynniku Poissona oraz że można regulować prędkością propagacji fal w układzie. Bardzo ważna jest praca H2, gdzie za pomocą symulacji metodą dynamiki molekularnej pokazano na kilku przykładach, że ruch rotacyjny

metamateriałów może być wynikiem ich wewnętrznych deformacji. Pokazano, że układy heksachiralne są tu najlepszymi metamateriałami z dyskretnym rozkładem masy. W pracach H3 i H4 zbadane zostały metamateriały chiralne, o strukturze warstwowej, ponownie zarówno eksperymentalnie i za pomocą symulacji metodą elementów skończonych. Pokazano po raz pierwszy, że mogą one wykonywać ruch rotacyjny bez udziału sił zewnętrznych, jedynie pod wpływem wewnętrznych deformacji, a deformacjami sterowano manipulując połączeniami składowych heksagonów. Praca H5 była próbą kontrolowania właściwości funkcjonalnych mechanicznych metamateriałów hierarchicznych (dwu- i trzy-wymiarowych) za pomocą nie tylko rozkładu masy ale i kompozytowej strukturą. Badano tu metamateriały o dwupoziomowej strukturze hierarchicznej. Przeprowadzono eksperymenty i symulacje metodą elementów skończonych kontrolując współczynnik Poissona za pomocą manipulacji łącznikami elementów konstrukcyjnych. W pracy H6 ponownie autor zajął się metamateriałami o dwupoziomowej strukturze hierarchicznej. Wykazywały one ujemny współczynnik Poissona, którego wartość, jak się okazało, można regulować w szerokim zakresie za pomocą niewielkich zmian parametrów konstrukcyjnych, zwłaszcza grubości zawiasów łączących elementy struktury. Jest to bardzo ważny wynik, ponieważ wskazuje, że z oddziaływań dwóch niezależnych mechanizmów auksetycznych obecnych w danej strukturze, auksetyczność systemu można regulować w zależności od konkretnego zastosowania. W pracy H7 zaprojektowano nowe trójwymiarowe metamateriały kompozytowe z inkluzjami magnetycznymi, które mają się charakteryzować ujemną sztywnością przyrostową i właściwościami auksetycznymi (w zależności od rodzajów owych inkluzji). Zastosowanie inkluzji magnetycznych, pozwoliło na stworzenie układu, w którym jego części składowe nie były fizycznie połączone i który miałby lepsze właściwości mechaniczne. Podobnie jak we wspomnianych wyżej pracach, zbadano je doświadczalnie i za pomocą symulacji komputerowych. Stwierdzono zachowanie auksetyczne i pokazano, że w zależności tylko od orientacji magnesów w strukturze,

układ może wykazywać dodatnią lub ujemną sztywność, którą można sterować poprzez zmianę wielkości momentu magnetycznego tych inkluzji magnetycznych. W projektowanych metamateriałach nietypowe właściwości mechaniczne zostały więc wprowadzone jednocześnie. W pracy H8 kontynuowano prace nad magneto-metamateriałami badając kompozyty zbudowane z metamateriałów magneto-mechanicznych pod kątem ich odporności na uderzenia w porównaniu do ich niemagnetycznych odpowiedników. Zaprojektowano dwuwymiarowy model takich układów i badano go za pomocą symulacji metodą dynamiki molekularnej. Pokazano, że poprzez odpowiednie rozmieszczenie inkluzji magnetycznych w układzie możliwe jest zminimalizowanie siły przenoszonej na obiekt przez ochronny metamateriał mechaniczny. W pracy H9 zaprojektowane zostały i zbadane zostały nowe metamateriały posiadające zdolność do znaczącej zmiany właściwości mechanicznych i mogący przechodzić z jednego typu konfiguracji do drugiego, przy czym jedna z nich ma mocno ujemny współczynnik Poissona, czyli układ jest silnie auksetyczny, a w drugiej współczynnik Poissona istotnie dodatni. Pokazano w eksperymencie i symulacji metodą elementów skończonych, że proces rekonfiguracji może być indukowany i kontrolowany zdalnie polem magnetycznym za pomocą odpowiednio rozmieszczonych inkluzji magnetycznych.

Autorowi udało się więc uzyskać nowe i nietypowe właściwości mechaniczne dla układów opartych na znanych już metamateriałach mechanicznych, a także zaproponował on i zaprojektował nowe metamateriały, wykazujące anomalne zachowania, ale w istotnie większej skali. Prace dra Dudka pokazują nowe rodzaje zachowań mechanicznych dzięki modyfikacjom znanych już metamateriałów. Zdolność takich układów do wywoływania własnej całkowitej rotacji w wyniku rotacji ich podjednostek też jest nowatorską koncepcją i pozwala pożądaną efekt obserwować oraz kontrolować jego zakres, zmieniając rozkład masy. Autor dokładnie też przebadął nową klasę mechanicznych metamateriałów, którymi są metamateriały hierarchiczne, dla których ujemny współczynnik Poissona może przyjmować znacznie większe

wartości niż w tradycyjnych metamateriałach. Proponowane nowe materiały nie ograniczają się do konkretnych geometrii i należy sądzić, że znajdą one zastosowanie w różnych innych systemach. Należy podkreślić, że pomysł wykorzystania inkluzji magnetycznych w metamateriałach mechanicznych jest stosunkowo nowy i został on istotnie rozwinięty przez dra Dudka.

Ewidentnie mamy więc do czynienia z jednotematycznym zestawem publikacji. Zwraca także uwagę konsekwencja i spójność programu naukowego realizowanego w tych pracach. Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego zostały przedstawione i omówione w autoreferacie. Przedstawiono i omówiono w nim najważniejsze wyniki, a ich prezentacja jest bardzo przejrzysta. Formalna strona przygotowania autoreferatu jest poprawna i napisany on został starannie. Moje niewielkie zastrzeżenie budzi jednak kilka spraw. W swoim autoreferacie Autor wymienia wnioski płynące z poszczególnych wyników badań we wszystkich 9 pracach oraz dokładnie i fachowo je omawia; zabrakło natomiast sformułowania wniosków bardziej uogólniających. Nie ma ich w podrozdziale 4.3.5 *Podsumowanie*. W podsumowaniu nie ma także oceny przydatności i stosowności użytych metod badawczych. Brakuje też uzasadnienia dlaczego Autor uważa prezentowane w zestawie wybranych prac wyniki za osiągnięcie naukowe.

Uważam, że dr Krzysztof Dudek jest przygotowany do kolejnego etapu kariery naukowej, to jest do pracy samodzielnego pracownika naukowego. Przeprowadzone przez niego badania dotyczące właściwości mechanicznych metamateriałów są ważne ze względu na potencjalne możliwości ich zastosowań oraz ciekawe z powodu ich złożonej struktury. Mamy więc do czynienia nie tylko z poszukiwaniem nowych materiałów funkcjonalnych o pożądanych właściwościach, ale także z udaną próbą zrozumienia ich własności na poziomie makroskopowym oraz innych mechanizmów odpowiedzialnych za te pożądane właściwości. Prace dra Dudka są więc krokiem na drodze do projektowania materiałów o pożądanych właściwościach. Trzeba jeszcze

podkreślić, że w recenzowanym osiągnięciu naukowym mamy do czynienia z wyraźnym rozwojem metodologii.

Podsumowując, bardzo wysoko oceniam dorobek naukowy wchodzący w skład omawianego osiągnięcia naukowego. Nie chodzi tu tylko o omówione wyżej parametry bibliometryczne (czynnik wpływu IF i liczba cytowań), podkreślić bowiem należy oryginalność badań, ich niemałą wartość poznawczą oraz potencjalną przydatność aplikacyjną. Przyjęta metoda badawcza była przez Autora cały czas udoskonalana i rozwijana, pozwalając na podjęcie nowych zagadnień i badania kolejnych ważnych układów, a cel naukowy, został niewątpliwie osiągnięty. Nie ma wątpliwości, że publikacje H1-H9, zgłoszone przez dra Dudka jako osiągnięcie naukowe, tworzą zwarty i spójny cykl jednotematyczny. Wszystkie te prace są wartościowe pod względem merytorycznym i charakteryzują się nowatorskim podejściem. W oparciu o analizę osiągnięcia naukowego „Sposoby kontroli właściwości mechanicznych oraz deformacji elastycznych w mechanicznych metamateriałach” uważam, że stanowi ono istotny wkład Autora w rozwój dyscypliny nauki fizyczne. Bardzo pozytywnie oceniam też całą aktywność naukową i zawodową Autora. Uważam więc, że dr Dudek spełnia wszelkie kryteria i wymogi formalne określone ustawowo oraz zwyczajowe i wnoszę o dopuszczenie go do dalszych etapów postępowania habilitacyjnego.

