

Warszawa, 03 stycznia 2026 r

dr hab. inż. Katarzyna A. Rutkowska, prof. uczelni  
Wydział Fizyki Politechniki Warszawskiej  
ul. Koszykowa 75  
00-662 Warszawa

**Recenzja rozprawy doktorskiej Pana magistra Yaroslava Harkavyi  
pt. *Formation mechanisms of single-particle-thick microstructures and the  
physical properties of the structures formed*  
(Mechanizmy formowania mikrostruktur o grubości jednej cząstki oraz  
właściwości fizyczne wytworzonych struktur)**

Zasadniczym celem rozprawy doktorskiej Pana mgr. Yaroslava Harkavyi było wykazanie możliwości efektywnego i powtarzalnego wytworzenia jednowymiarowych mikrostruktur, docelowo do zastosowania jako trwałe i wysokoprzewodzące mikrościeżki. Praca ta, łącząca aspekty pracy poznawczej, eksperymentalnej i modelowania numerycznego, powstała pod kierunkiem Pana dr. hab. Zbigniewa Rozyńka z Katedry Akustyki na Wydziale Fizyki i Astronomii Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu oraz opieką promotora pomocniczego, Pana dr. Konrada Giżyńskiego z Instytutu Chemii Fizycznej PAN w Warszawie. Przeprowadzone prace i badania powiązane były z realizacją projektu NCN OPUS17 nt. *Wydajny sposób wytwarzania mikrościeżek o grubości pojedynczej cząstki oraz ich charakteryzacja i stosowalność*, kierowanego przez promotora pracy. Warto przy tym wspomnieć, że część prowadzonych badań była bezpośrednio lub pośrednio wsparta przez (prostą) spółkę akcyjną Cadenas z siedzibą w Bydgoszczy.

Doktorant realizował zarówno badania eksperymentalne jak i przeprowadzał symulacje numeryczne w obszarze fazy materii miękkiej i materiałów funkcjonalnych, koncentrując się przy tym na zastosowaniu pola elektrycznego do porządkowania mikrocząstek w celu formowania z nich ścieżek przewodzących. Istotne jest, że przeprowadzone przez Doktoranta **prace mają zarówno charakter badań podstawowych** (obejmując przy tym analizę fundamentalnych dla procesu zjawisk), **jak i badań o potencjale aplikacyjnym i przemysłowym** (z pewnym prawdopodobieństwem praktycznego wdrożenia uzyskanych wyników). Należy bowiem podkreślić, że opanowanie w pełni kontrolowalnej i powtarzalnej metody wytwarzania mikrościeżek, będących tematem niniejszej rozprawy doktorskiej



(nazywanych w literaturze ścieżkami koralikowymi, strukturami łańcuchowymi czy po prostu łańcuchami), jest niezwykle ważne, po to aby móc analizować i badać ich właściwości a następnie wykorzystywać je do projektowania i wykonywania nowoczesnych materiałów i układów funkcjonalnych. Obecnie kluczową barierą dla powszechnego ich zastosowania jest niedostępność technologii pozwalającej na tanie, szybkie i powtarzalne wytwarzanie ścieżek koralikowych. Co prawda istnieje szereg metod formowania takich struktur, lecz zwykle towarzyszy im co najmniej jedna, a często łącznie kilka istotnych wad, do których zaliczyć można: wysokie koszty, duża czasochłonność, trudność w tworzeniu ścieżek o nieliniowym (złożonym) kształcie, brak możliwości ich precyzyjnego układania w dowolnym miejscu i na różnym typie podłoża, wymóg pracy wyłącznie w środowisku ciekłym, konieczność stosowania zaawansowanej aparatury albo ograniczenie długości uzyskiwanych struktur łańcuchowych. Nic więc dziwnego, że zasadniczym celem prowadzonych przez Doktoranta prac było opracowanie i rozwinięcie metody wysokowydajnego wytwarzania ścieżek koralikowych, która eliminuje lub przynajmniej mityguje powyższe ograniczenia i pozwala formować mikrościeżki na praktycznie dowolnych podłożach, zarówno sztywnych, jak i elastycznych, o powierzchniach gładkich i chropowatych.

**Podstawą opracowanej metody** jest potwierdzone w trakcie prowadzonych badań założenie, że pole elektryczne, wspomagane siłami kapilarnymi, może inicjować ekstrakcję przewodzących mikrocząstek z cieczy, prowadząc do formowania łańcuchów o grubości pojedynczej cząstki. Przeprowadzone przez Doktoranta systematyczne badania eksperymentalne w tym zakresie pozwoliły określić warunki i parametry, dla których proces jest optymalny, potwierdzając w ten sposób możliwość uzyskania uniwersalnej i niskobudżetowej metody wytwarzania jednowymiarowych mikrostruktur. Opracowanym w dalszym toku badań (wspartych modelowaniem numerycznym) wariantem tej metody jest wyciąganie cząstek z menisku utworzonego na końcówce przewodu, będącego jednocześnie elektrodą. Na podstawie przeprowadzonych prac opanowano sposób precyzyjnego sterowania długością formowanej ścieżki koralikowej, jak również zdobyto wiedzę i doświadczenie w tym, jak materiał, grubość i geometria podłoża oraz warunki zewnętrzne (w tym wilgotność otoczenia) wpływają na rozpoczęcie i stabilność procesu wytwarzania łańcucha.

Bardzo ważnym etapem prowadzonych prac było zbadanie wytworzonych jednowymiarowych struktur pod kątem ich właściwości fizycznych, w tym



mechanicznych i elektrycznych, co ma znaczenie nie tylko poznawcze, ale przede wszystkim aplikacyjne.

Co więcej, mając na uwadze aspekty praktycznego wykorzystania prowadzonych badań, dużo uwagi poświęcono zagadnieniu, jakim jest **przekształcenie wytworzonych łańcuchów w funkcjonalne przewodniki i ścieżki przewodzące**. W szczególności, w pracy zaproponowano i przebadano **dwa sposoby obróbki łańcuchów**, jakimi jest mechaniczne ściskanie oraz zgrzewanie Joule'a. Po raz kolejny nie było to tylko zadanie i czysto eksperymentalne, ale prowadzone działania wsparte były analizą wyników symulacji numerycznych (przeprowadzonych metodą elementów skończonych) o charakterze odpowiednio mechanicznym i elektrotermicznym. Pozwoliło to na określenie parametrów procesu wytwarzania mikrościeżek, umożliwiając dopasowanie pola kontaktu między mikrocząstkami wchodzącymi w ich skład, co wpływa bezpośrednio na właściwości elektryczne ścieżek i formowane z nich kształty. Ostatecznie dowiedziono, że obie wersje metody pozwalają przekształcić nietrwałe ścieżki koralikowe o grubości pojedynczej cząstki w **trwałe mikrościeżki o przewodności zbliżonej do materiału litego**, stanowiąc tym samym alternatywę do stosowanych spiekanych tuszy czy past z nanocząstek. Warto zaznaczyć, że opracowana metoda może być stosowalna dla szerokiej gamy materiałów wykonanych zarówno z cząstek stałych (przewodzących elektrycznie lub rezystywnych), cząstek miękkich, mikrokapsulek i innych, o różnych rozmiarach (od 50 $\mu\text{m}$  do 1mm) i na różnych podłożach (w tym elastycznych).

**Rozprawa doktorska**, napisana w języku angielskim, ma postać **zbioru pięciu tematycznie powiązanych artykułów** naukowych, obejmującego cztery, opublikowane już w renomowanych czasopismach recenzowanych prace (w tym 3 prace mają  $IF_{2024} = 7,9$ ) oraz jedną wysłaną jesienią 2025 roku do recenzji do czasopisma naukowego z grupy *Elsevier* (bez wskazania konkretnego tytułu czasopisma; na chwilę obecną nie odnaleziono informacji o jej publikacji). W trzech z pięciu wymienionych prac, Pan Harkavyi występuje jako pierwszy autor, co świadczy o znaczącej roli, jaką pełnił w przeprowadzonych badaniach. **Ważnym elementem** opracowania, który niewątpliwie ułatwia czytelnikowi zapoznanie się z treścią wspomnianych prac naukowych, jest **obszerne, ponad pięćdziesięciostronicowe wprowadzenie**, podzielone na pięć tematycznych rozdziałów i zawierające dodatkowo spis referencji (Rozdział 6, obejmujący 33 pozycje literaturowych). Do pracy, oprócz pełnych wersji manuskryptów (Rozdział 7), dołączono również oświadczenia współautorów prac wchodzących w skład dysertacji (Rozdział 8), jak również dwa dodatki stanowiące odpowiednio G-kod z instrukcjami poleceń do



wytworzenia (przy użyciu mikrowiertel) styków z elementami wchodzącymi w skład struktury mikrołańcucha (dla konkretnej drukarki 3D z głowicą CNC) oraz skrypt w języku Java pozwalający na zautomatyzowanie przeprowadzania symulacji numerycznych z użyciem oprogramowania COMSOL *Multiphysics*.

Praca nie ma wyraźnie postawionej tezy a w to miejsce na początku swojej pracy Doktorant wskazał **trzy główne cele prowadzonych badań**, do których należy: **(i)** zrozumienie mechanizmów fizycznych związanych z osadzaniem mikrocząstek z fazy ciekłej pod wpływem pola elektrycznego, w tym roli parametrów pola, geometrii cząstek oraz oddziaływań na granicy ciecz-podłoże; **(ii)** zrozumienie podstawowych zasad wiążących geometrię i układ powstałych mikrostruktur z ich odpowiedzią mechaniczną i elektryczną, w tym zmian wprowadzanych przez procesy obróbki końcowej, w tym przypadku związanej z wytworzeniem trwałych, wysoko-przewodzących mikrościeżek; **(iii)** ocena stosowalności wytworzonych mikrostruktur w warunkach zbliżonych do rzeczywistych, np. w mikroelektronice lub materiałach kompozytowych. Realizacji wymienionych celów służyły sukcesywnie i konsekwentnie podejmowane przez Doktoranta działania stanowiące logiczny ciąg badawczy. Warto przy tej okazji jeszcze raz podkreślić, że niniejsza praca doktorska obejmuje szeroki zakres koncepcyjnych, technologicznych i eksperymentalnych, wsparty dodatkowo analizą teoretyczną (w tym głównie numeryczną).

W **Rozdziale 1**, stanowiącym bardzo dobre wprowadzenie do tematyki rozprawy doktorskiej, zaopatrując czytelnika w niezbędną wiedzę teoretyczną, przedstawiono możliwe metody formowania, jak i obróbki struktur koralikowych, wskazując również na potencjalne zastosowania wynikające z ich unikatowej budowy i geometrii. Autor wprowadza w tym rozdziale podstawowe wzory, zagadnienia i pojęcia niezbędne do zrozumienia dalszej części rozprawy, jak również przywołuje przykłady zastosowań struktur koralikowych pochodzące z aktualnej literatury światowej (obejmujące przykładowo falowody optyczne, ścieżki przewodzące w elektronice, robotykę miękką, czujniki i metamateriały). Daje to czytelnikowi szansę na szybkie zapoznanie się z aktualnym stanem wiedzy w danej tematyce, jak również na ocenę wartości aplikacyjnej pracy i zaproponowanych w niej rozwiązań. W szczególności, odnosząc się do prac i osiągnięć Autora należy w tym miejscu wskazać na wytwarzanie struktur wykorzystując wzmocnienie zmiennego pola elektrycznego w obszarze bliskiego kontaktu, co umożliwia ekstrakcję przy osiągalnych eksperymentalnie wartościach napięcia. Omawiając metody obróbki końcowej, mające na celu przekształcenie początkowo słabych styków punktowych między



cząstkami w trwałe połączenia o znacząco poprawionej przewodności elektrycznej, obok znanych z literatury metod (spiekania termicznego czy spawania laserowego) wskazano na zastosowane w pracy metody łączenia indukowanego prądem elektrycznym (nagrzewanie oporowe/Joule'a) oraz uzyskane na skutek ściskania mechanicznego. Warto przy tym zaznaczyć, że przeprowadzone badania właściwości fizycznych (w tym w tym właściwości mechanicznych i elektrycznych oraz korelacji między nimi) łańcuchów wykazały silne sprzężenie elektromechaniczne, w którym deformacja ściskająca może znacząco zmniejszyć rezystancję elektryczną, przy czym łańcuchy wymagają większych sił ściskających niż izolowane cząstki ze względu na boczne więzy nakładane na sąsiednie mikrosfery. Pomiar właściwości elektrycznych wykazały, że łańcuchy po odpowiedniej obróbce mogą osiągnąć rezystywność zbliżoną do wartości dla metalu litego. Na koniec rozdziału opracowano i przedstawiono hierarchię modeli materiałowych (od prostej liniowej sprężystości po model plastyczności Johnsona-Cooka) niezbędne do opisu deformacji ściskającej i do przeprowadzenia symulacji numerycznych (metodą elementów skończonych) odkształceń pojedynczych cząstek i łańcuchów przy różnych prędkościach płyty dociskowej i w różnych temperaturach wykorzystywanych w warunkach eksperymentalnych.

**Rozdział 2** opisuje metody eksperymentalne opracowane i zastosowane w trakcie badań, aspekty technologiczne związane z formowaniem łańcuchów, techniki charakteryzacji ich parametrów i właściwości fizycznych oraz specjalnie zaprojektowane stanowiska badawcze. W szczególności, opracowano i opisano dwie odrębne metody formowania łańcuchów cząstek: (i) metodę zanurzania igłowej elektrody w zawiesinie cząstek oraz (ii) bardziej praktyczną i skalowalną jej alternatywę, wykorzystującą wyciąganie łańcuchów bezpośrednio z menisku uformowanego na wylocie przewodzącej kapilary (zasilanej przez precyzyjną pompę strzykawkową), tworząc konfigurację umożliwiającą ciągłe dostarczanie cząstek, eliminując konieczność powtarzania cykli zanurzania (jak w metodzie z igłą) i zapewniając przez to lepszą powtarzalność i wydajność procesu.

Następnie w tym samym rozdziale opisano wykorzystywane metody charakteryzacji i techniki pomiarowe. I tak, jeśli chodzi o metody ilościowego określenia zmiany kształtu pod wpływem ściskania, zastosowano trzy podejścia: (1) wykorzystanie alternatywnego (powiększonego) układu modelowego, w którym kule z plasteliny były ściskane w celu odwzorowania zachowania łańcuchów mikrocząstek (gdzie pola powierzchni styku wyznaczano metodą cyfrowej analizy obrazu oraz odcisków na papierze); (2) ściskanie pojedynczej ograniczonej cząstki umieszczonej pomiędzy



przezroczystymi ściankami w celu obserwacji efektów w czasie rzeczywistym (co okazało się nieskuteczne ze względu na niedostateczne uszczelnienie powodujące wyciek materiału oraz uszkodzenia mechaniczne pod zastosowanym obciążeniem); (3) przyrostowe (z krokiem ~5%) ściskanie łańcuchów a następnie przeprowadzanie mikroskopowego badania odłączanych od nich cząstek w celu określenia pól powierzchni styku oraz stopnia odkształcenia (co stało się metodą docelową a wyniki badań posłużyły do weryfikacji rezultatów symulacji numerycznych). Charakterystykę reologiczną uzyskano z użyciem reometru w geometrii płyta-płyta, uzyskując w ten sposób informacje na temat sił ściskających wymaganych do odkształcenia cząstek o różnych średnicach w różnych temperaturach i przy różnych współczynnikach i prędkościach ściskania. Chropowatość powierzchni (odgrywającą istotny wpływ na rezystancję elektryczną, w szczególności przy niskich stopniach ściskania) określono za pomocą wykorzystania dwóch komplementarnych technik obrazowania – skaningowej mikroskopii elektronowej (do wstępnego oszacowania chropowatości i innych niedoskonałości powierzchni) i profilometrii stykowej (mechanicznej), pozwalającej uzyskać ilościowe informacje na temat chropowatości (przy czym wartości te wykorzystano jako parametry wejściowe do obliczeń numerycznych). Do pomiarów rezystancji łańcuchów początkowo zastosowano metodę czteroelektrodową, jednakże z uwagi na trudności związane z przemieszczaniem się cząstek podczas cykli pomiarowych, czasochłonnością procedury oraz niemożnością wykonania pomiarów wysokoczęstotliwościowych, zdecydowano się na wykorzystanie precyzyjnego analizatora impedancji z niestandardowym dwuzaciskowym nośnikiem PCB, umożliwiającego wykonanie niskosumowych pomiarów *in situ* podczas ściskania łańcuchów (ze stopniem ściskania wyznaczanym na podstawie obrazów z kamery rejestrującej widok z góry na pola powierzchni styku), zbliżających się do granicy czułości przyrządu. Wreszcie, jako alternatywną metodę do ściskania mechanicznego, stosowanego w celu poprawy przewodności obrabianego łańcucha, opracowano układ do spiekania elektrycznego (wykorzystującego wywołane przez przepływ prądu lokalne nagrzewanie Joule'a w obszarze styków cząstek, skutkujące topnieniem i tworzeniem trwałych połączeń), charakteryzujący się w pełni zautomatyzowanym procesem przygotowania próbek (wymagającym wytworzenia niezawodnych styków elektrycznych poprzez sterowane numerycznie osadzanie mikrowierteł w cząstkach wchodzących w skład łańcucha) oraz układem wahadłowym służącym do spiekania dwóch cząstek (z ultraszybką kamerą do rejestracji czasowej ewolucji obszaru styku podczas spiekania indukowanego prądem).



W **Rozdziale 3** znajdują się informacje na temat przeprowadzonych przez Doktoranta symulacji numerycznych (w programie COMSOL Multiphysics 6.1 z wykorzystaniem wielu, wykorzystywanych w tej pracy również łącznie, specjalistycznych modułów) dotyczących różnych zjawisk i procesów mających miejsce i zachodzących w trakcie przeprowadzanych badań, w tym przykładowo ściskania mechanicznego, nagrzewania oporowego, czy przyciągania elektrostatycznego, przedstawiając przy tym stosowane geometrie i siatki obliczeniowe, zastosowane modele fizyczne, parametry wejściowe oraz warunki brzegowe. Wyniki przeprowadzonych symulacji komputerowych i ich analiza pozwoliły na weryfikację słuszności przyjętych modeli fizycznych oraz ustalenie mikroskopowych mechanizmów leżących u podstaw formowania i działania przewodzących struktur bazujących na ścieżkach koralikowych. W szczególności, obliczenia numeryczne zostały przeprowadzone w celu uzupełnienia badań eksperymentalnych, umożliwiając analizę zjawisk zbyt złożonych dla rozwiązań analitycznych, zachodzących w skali zbyt małej dla bezpośredniej obserwacji tych efektów, wykazujących szybką ewolucję pól, czy niemożność wykonania pomiaru bez zakłócania układu. Co ważne, modelowanie numeryczne przeprowadzono według strategii progresywnej i z rosnącą złożonością: począwszy od analizy efektów ściskania pojedynczej cząstki, następnie rozszerzając analizę na układy wielocząstkowe, symulując następnie rezystancję elektryczną pod wpływem ściskania, nagrzewanie Joula'a i uzyskiwane w ten sposób topnienie w punktach styku cząsteczek, oraz w końcowym etapie modelowanie przyciągania elektrostatycznego do podłoża, określając w ten sposób parametry niezbędne do wytwarzania mikrościeżek. W szczególności, w symulacjach numerycznych dotyczących ściskania mechanicznego zastosowano prawo Johnsona-Cooka (uwzględniające prędkość odkształcenia oraz zmiękczenie termiczne z parametrami skalibrowanymi na podstawie wyników eksperymentalnego ściskania pojedynczych cząstek) w połączeniu z metodą kontaktu z rozszerzonym mnożnikiem Lagrange'a do modelowania pojedynczych cząstek, skończonych i nieskończenie długich łańcuchów cząstek, wykorzystując redukcje symetrii w celu minimalizacji czasu obliczeniowego przy jednoczesnym zachowaniu możliwości wyznaczenia pól odkształceń i ciśnienia kontaktowego. Warto zauważyć, że podczas przeprowadzania symulacji rezystancji elektrycznej, importowano dane na temat odkształceń i ciśnienia kontaktowego z symulacji mechanicznych, jak również powiązano prądy elektryczne z wymianą ciepła, uwzględniając przy tym dodatkowo eksperymentalnie zmierzoną chropowatość powierzchni w celu określenia przewodności (dla różnych stopnia



ściskania obliczenia przeprowadzono z użyciem zautomatyzowanego skryptu). Natomiast symulacje numeryczne mające na celu analizę procesu nagrzewania Joule'a, wykorzystywały szerokie ramy obliczeniowe, sprzęgając różne modele obliczeniowe, w tym opisujące ogrzewanie elektromagnetyczne oraz przepływ nieizotermiczne, przy zastosowaniu ruchomej siatki obliczeniowej (ze względu na konieczność uwzględnienia zmiany kształtu) w celu zbadania warunków indukowania trwałego połączenia stykach międzycząstkowych na skutek lokalnego topnienia. Dodatkowo, symulacje elektrostatyczne pozwoliły ilościowo określić siłę przyciągania między spolaryzowanymi cząstkami a podłożami jako funkcję odległości i właściwości podłoża, dostarczając ważnych informacji na temat napięcia progowego niezbędnego dla oderwania cząsteczki od menisku i rozpoczęcia procesu formowania łańcuchów przewodzących mikrocząstek.

**Rozdział 4** podsumowuje najważniejsze osiągnięcia opisane w pięciu publikacjach (Artykuły I-V) wchodzących w skład dysertacji, wskazując na ich powiązania tematyczne, logiczną sekwencję i stworzoną w ten sposób spójną ścieżkę badawczą: od formowania łańcuchów, przez charakteryzację mechaniczną, aż po optymalizację właściwości elektrycznych. Główne wnioski z przeprowadzonych prac przedstawiono w **Rozdziale 5**. Treści artykułów zawierają szczegółowe dane i wyniki, stanowiąc rozwinięcie aspektów przedstawionych w Rozdziałach 1-3 wstępu pracy (co opisano powyżej). I tak Artykuł I przedstawia uniwersalną (tj. obowiązującą dla cząstek stałych, typu rdzeń-powłoka, miękkich, a także o niesferycznych kształtach) metodę wytwarzania jednowymiarowych struktur o grubości pojedynczej cząstki z wykorzystaniem oddziaływań elektrycznych i kapilarnych, identyfikując rolę sił kapilarnych (oraz mostków kapilarnych typu I i II), ustalając wymagane parametry procesu, jak również wskazując na możliwe zastosowanie jako przewodzące mikrościeżki z rezystancją zmniejszoną o rzędy wielkości po ściskaniu mechanicznym. Artykuł II przedstawia sposób i wyniki rozwinięcia metody wytwarzania poprzez wprowadzenie ciągłego, skalowalnego podejścia wykorzystującego układ odwróconego menisku. W pracy zidentyfikowano kluczowe możliwe przyczyny niestabilności procesu (jak również możliwości ich eliminacji), powodujące wyginanie i ograniczające długość formowanego łańcucha. Przedstawiono potencjalne zastosowania obejmujące wytwarzanie struktur helikalnych wokół światłowodu, połączeń elektrycznych między wyprowadzeniami PCB, struktur o wysokiej wytrzymałości mechanicznej znoszących setki cykli ściskania i odprężania, a także możliwość sterowanego napięciowo, odwracalnego wydłużania i skracania łańcucha. Artykuł III zawiera wyniki przeprowadzonych w



sposób systematyczny i metodyczny badań mających na celu określenie skutków mechanicznego ściskania cząstek i łańcuchów, weryfikując między innymi stosowalność i dokładność modelu Johnsona-Cooka (przy czym pomyślnie odtworzono wyniki eksperymentalne w szerokich zakresach odkształceń, prędkości odkształcenia i temperatur). Główne wnioski z przeprowadzonych prac obejmują sformułowanie empirycznego prawa skalowania, w którym siła ściskająca wykazuje kwadratową zależność od średnicy cząstki, słabą zależność od prędkości odkształcenia oraz silną wrażliwość na temperaturę. Dowiedziono dominującej roli czynnika termicznego (w porównaniu do szybkości odkształcenia), co pozwala na zwiększenie wydajności procesu wytwarzania bez nadmiernego wzrostu siły. Zauważono, że liniowe łańcuchy cząstek wykazują większą odporność na odkształcenie niż równoważne cząstki ze względu na więzy narzucone przez sąsiadów. Co więcej udowodniono, że ciśnienie kontaktowe (na granicy płyta-cząstka i między cząstkami) jest wyższe w konfiguracji łańcuchowej. W Artykule IV natomiast udało się nakreślić pełne ramy jeśli chodzi o metodologię i technologię wytwarzania funkcjonalnych przewodzących mikrościeżek, przedstawiając tę technikę jako uzasadnioną alternatywę do stosowanych past i tuszy na bazie nanocząstek (srebra). Udało się przy tym określić ilościowe zależności odkształcenie-rezystancja, jak również potwierdzić stosowalność modelu elektromechanicznego w symulacjach, uwzględniając przy tym wpływ chropowatości powierzchni. Warto zwrócić uwagę na fakt, że w Artykule IV opisano również skutki występowania nieidealności układów (wynikających z polidispersyjności czy niewspółosiowości), jak również przedstawiono możliwość praktycznego i bezdefektowego formowania mikrościeżek na delikatnych podłożach (w tym przykładowo na płytkach krzemowych), stosując metodę obróbki w podwyższonej temperaturze. Artykuł V przedstawia spiekanie elektryczne jako alternatywną metodę obróbki łańcuchów, szczególnie w przypadkach gdy ściskanie mechaniczne jest niepraktyczne lub wręcz niemożliwe do wykorzystania (np. w przypadku podłoża z komponentami elektronicznymi bądź stworzonego z cienkich folii). Wykazano, że proces formowania metalicznych szyjek w skutek spiekania elektrycznego jest procesem zachodzącym w skali milisekund, inicjowanym przez mikrosekundowe skoki prądu koncentrujące ciepło Joule'a w przewężeniach, co prowadzi do lokalnego topnienia i zwiększenia wysokości połączenia zgodnie z wykładniczą zależnością od napięcia. Kluczowym parametrem determinującym kinetykę i skuteczność omawianego procesu jest początkowa geometria styku. Mniejsza powierzchnia kontaktu sprzyja koncentracji gęstości prądu i osiągnięciu wyższych temperatur, podczas gdy nadmierny docisk wstępny,



zwiększający obszar styku, uniemożliwia topnienie i rozpoczęcie procesu. Wykazano również przewagę sterowania stałoprądowego (lub stałomocowego) nad impulsowym, zapewniając dłuższe utrzymanie temperatury procesu i uzyskanie płynnego spadku rezystancji. Metoda ta umożliwia jednoczesne łączenie wielu punktów styków w łańcuchach cząstek w pojedynczym cyklu, przy czym proces wykazuje cechy samostabilizacji (wzrost przekroju czynnego szyjek obniża lokalną rezystancję, naturalnie ograniczając dalsze nagrzewanie i zapobiegając niekontrolowanej koalescencji materiału).

Wnioski przedstawione w Rozdziale 5 podkreślają raz jeszcze, że rozprawa ma na celu przedstawienie fundamentalnych mechanizmów formowania ścieżek koralikowych, przybliżając jednocześnie wybrane procesy ich obróbki (w tym opracowaniu przeprowadzonej poprzez ściskanie mechaniczne i nagrzewanie Joule'a) jako kluczowe dla uzyskania finalnych właściwości mikrościeżek przewodzących. Opracowane, wdrożone i opisane metody i procesy technologiczne pozwalają na uzyskanie zespołów cząstek ewoluujących od kruchych (sterowanych polem elektrycznym) łańcuchów do wytrzymałych struktur w skali mikro o przestrajalnych właściwościach. Otrzymanie przedstawionych wyników prac badawczych nie byłoby możliwe bez wsparcia ze strony analizy wyników symulacji numerycznych łączących ze sobą modele elektro-termo-mechaniczne, pozwalające powiązać ze sobą procesy odpowiedzialne za przewodność i zmiany strukturalne.

Odnosząc się do formy i treści rozprawy, należy stwierdzić, że opracowane wprowadzenie, jak wchodzące w jej skład artykuły naukowe, napisane są bardzo starannie, z dużą dbałością o szczegóły. Praca scala w sposób bardzo przejrzysty i systematyczny otrzymane wyniki symulacji numerycznych z wynikami badań eksperymentalnych i prac technologicznych, wyraźnie realizując postawione na początku pracy cele. Wyniki przeprowadzonych prac koncepcyjnych i badawczych zostały dokładnie opisane i przeanalizowane, jak również właściwie zilustrowane zdjęciami (przedstawiającymi układy pomiarowe, czy też kolejne etapy wytwarzania łańcuchów i mikrościeżek przewodzących), rysunkami poglądowymi pokazującymi geometrie układów rozpatrywane w symulacjach numerycznych, jak również wykresami, ułatwiającymi zrozumienie uzyskanych wyników badań i analiz. Wiele wnoszą również filmy dołączone w dużej liczbie do dokumentacji uzupełniającej publikację. Nie zauważyłam w pracy błędów merytorycznych czy formalnych, jak również nie znalazłam ewidentnych błędów językowych czy edytorskich. Nie jest to co prawda dużym zaskoczeniem, mając na uwadze, że artykuły wchodzące w skład



recenzowanej pracy przeszły wymagający proces recenzji, jak również zostały sformatowane zgodnie z wymaganiami edytora i wytycznymi wydawcy czasopism.

Ponieważ rolą recenzenta jest krytyczne odniesienie się do treści rozprawy, jako dodatkowe uwagi wskazałabym drobne aspekty edycyjne – takie jak brak numeracji wzorów w Rozdziałach 1-3. Zastanawiający jest również brak słupków niepewności w przypadku danych przedstawionych przykładowo na Rys. 3 i Fig. 8 z Art. I, jak również wielu innych. Przy tej okazji chciałabym również zwrócić uwagę na dość arbitralne podejście do łączenia danych pomiarowych i symulacyjnych na wykresach – w niektórych przypadkach są to krzywe złożone typu *spline* czy *b-spline* (czyli reprezentacji parametrycznych krzywych sklejanych) a czasami są to po prostu odcinki proste łączące środki punktów na wykresie. Nie w każdym przypadku można taki zabieg zastosować – a jeśli tak, to należałoby wskazać, że poprowadzona linia jest narysowana dla skupienia uwagi (stanowiąc „wskazówkę” dla oka). Dodatkowo, wydaje mi się, że aby ocenić czy proponowana metoda wytwarzania ścieżek przewodzących jest konkurencyjna do innych metod funkcjonujących na rynku, warto byłoby oprócz porównania kosztów materiałowych, wpływu środowiskowego i uzyskiwanej względnej przewodności (jak w Tab. 1 w Art. V) warto byłoby również porównać koszty wymaganej aparatury, procesu technologicznego, jak również czasochłonność i wielkość powierzchni możliwych do pokrycia (w tym mając ewentualnie na uwadze oferowaną złożoność kształtu ścieżek). Moje dodatkowe pytanie dotyczy parametrów (i ich niepewności) krzywych przedstawionych na Fig. 5 (Art. V). Nie do końca jasne może być dla czytelnika, czy wyniki przedstawione na Fig. 10 są wynikami symulacji numerycznych (brak wyraźnego wskazania w treści artykułu i podpisie rysunku). Co więcej zastanawiające jest dlaczego w przypadku Fig. 10b wyniki nie są zebrane dla pośrednich wartości mocy (mocy czego w realnych warunkach?) – co pozwoliłoby na uzyskanie bardziej gładkich krzywych (tu w nawiązaniu do stosowania lub nie stosowania krzywych sklejanych). Podsumowując tę część recenzji należy zaznaczyć, że powyższe uwagi w żadnej sposób nie podważają wysokiej oceny rozprawy doktorskiej i oryginalnych osiągnięć Doktoranta.

**Dorobek naukowy Doktoranta** dobrze świadczy o jego zaangażowaniu w prace badawcze, cechując się swobodą w formułowaniu hipotez badawczych, jak również wypracowanym bogatym warształem analitycznym (w tym numerycznym) i eksperymentalnym. Z opinii przedstawionej przez promotora można dowiedzieć się, że Doktorant jest osobą aktywną naukowo, posiadającą zdolność do samodzielnego planowania i prowadzenia prac badawczych. **Na uwagę zasługuje dorobek poza tematyką samej rozprawy**, w tym wartościowe publikacje oraz wystąpienia



konferencyjne. Przykładowo wyniki prac prowadzonych podczas realizacji pracy dyplomowej magisterskiej zostały opublikowane w czasopiśmie *Scientific Reports* (5-letni  $IF_{2024} = 4,3$ ), a współpraca z prof. Józefczakiem (z Katedry Akustyki UAM) zaowocowała publikacją w czasopiśmie *Ultrasonic Sonochemistry* (5-letni  $IF_{2024} = 9,1$ ). Dodatkowo Pan Yaroslav Harkavyi prezentował wyniki swoich prac na licznych konferencjach krajowych i zagranicznych (minimum 10 pozycji wskazanych w opinii promotora), odbył po 3 wizyty badawcze odpowiednio na Uniwersytecie w Oslo i w Instytucie Chemii Fizycznej PAN. Uczestniczył w serii szkoleń *Power Electronics Packaging - Training and Upskilling*, otrzymując certyfikat *Ansys Associate*. Szkoda, że dane te (uzyskane na podstawie opinii promotora) nie znalazły się w załączniku rozprawy, uzupełniając w ten sposób informacje na temat pełnego dorobku i zaangażowania naukowego Doktoranta.

Wracając do kwestii recenzowanej rozprawy doktorskiej Pana mgr. Yaroslava Harkavyi, należy stwierdzić, że jest ona dziełem wartościowym a uzyskane ciekawe i oryginalne wyniki i rozwiązania mogą stanowić zauważalny wkład w rozwój współczesnej fizyki i inżynierii materiałowej, jak również przyczynić do rozwoju nowych technologii o dużym potencjale praktycznym, aplikacyjnym i wdrożeniowym. Co więcej stanowią one niewątpliwie fundament dla wykorzystania uzyskanych wyników (łączyących rozważania teoretyczne, aspekty technologiczne i badania eksperymentalne), jak również dla kontynuacji badań podstawowych i prac technologicznych na styku materii miękkiej, fazy skondensowanej i układów niskowymiarowych o właściwościach sterowanych polem elektrycznym. Można jednocześnie założyć, że uzyskane przez Doktoranta wyniki badań spotkają się z szerokim zainteresowaniem zarówno w sferze nauki, jak i przemysłu. Kluczową wartością poznawczą jest szczegółowe wyjaśnienie mechanizmu formowania mikrościeżek, ze szczególnym uwzględnieniem roli oddziaływań elektrostatycznych i kapilarnych, powstawania mostków kapilarnych pomiędzy cząstkami w łańcuchu oraz wpływu pola elektrycznego na sztywność struktury. Z perspektywy aplikacyjnej i odbiorcy z otoczenia przemysłowego ważne są praktyczne cechy i uniwersalność ścieżek koralikowych, które mogą znaleźć zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu, w szczególności w elektronice (zarówno klasycznej jak i elastycznej). Mikrościeżki uformowane z pojedynczych cząstek ułożonych w łańcuchy mogą wykazywać niższą rezystywność niż struktury oparte na nanocząstkach, a wykorzystanie mikrocząstek (np. srebra czy miedzi) może znacząco zredukować koszty materiałowe (co można ocenić czytając Tab. 1 zamieszczoną w Art. V). Ponadto periodyczność takich struktur ułatwia ich spiekanie do postaci litej i pozwala uzyskać



unikatowe właściwości fizykochemiczne (trudne do uzyskania w strukturach złożonych z zagregowanych nanocząstek). Połączenie wspomnianych zalet materiałowych z potencjalną możliwością wytwarzania na dowolnym podłożu, stanowi solidną podstawę do dalszych prac badawczo-rozwojowych oraz ewentualnej komercjalizacji wyników badań.

Podsumowując stwierdzam, że **praca doktorska jak i dorobek naukowy jej Autora spełniają warunki ustawowe stawiane rozprawom doktorskim**, stąd wnoszę o dopuszczenie Pana mgr. Yaroslava Harkavyi przez Radę Dyscyplin Nauki Fizyczne i Astronomia Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu do dalszych etapów postępowania doktorskiego.

Katarzyna A. Rutkowska