



UNIwersytet
WARSAWski

Wydział Fizyki

WYDZIAŁ
FIZYKI

Warszawa, 6 lutego 2026 r.

dr hab. Maciej Lisicki, prof. UW
Instytut Fizyki Teoretycznej
Wydział Fizyki
Uniwersytet Warszawski

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Yaroslava Harkavyi
pt. „Formation mechanisms of single-particle-thick microstructures and the physical
properties of the structures formed”**

Rozprawa doktorska autorstwa mgr. Yaroslava Harkavyi dotyczy została przygotowana na Wydziale Fizyki i Astronomii Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu pod kierunkiem promotora, dr. hab. Zbigniewa Rozyńka, oraz promotora pomocniczego, dr. Konrada Giżyńskiego z Instytutu Chemii Fizycznej PAN w Warszawie. Praca została złożona w formie cyklu tematycznie spójnych publikacji naukowych, uzupełnionych obszerną częścią syntetyzującą, w której autor w sposób uporządkowany omawia motywację badań, aktualny stan wiedzy, zastosowaną metodykę, uzyskane wyniki oraz ich interpretację.

Tematyka rozprawy skupia się na zagadnieniu formowania jednowymiarowych koralikowych mikrostruktur o grubości pojedynczej cząstki, a także na analizie ich właściwości mechanicznych, elektrycznych i elektromechanicznych. Głównym celem pracy jest dogłębne zrozumienie mechanizmów fizycznych odpowiedzialnych za ekstrakcję i stabilizację łańcuchów cząstek poza fazą ciekłą, opracowanie metod umożliwiających ich kontrolowane i skalowalne wytwarzanie oraz określenie sposobów modyfikacji ich właściwości poprzez odpowiedni post-processing. Autor konsekwentnie dąży do powiązania geometrii i deformacji struktur z ich przewodnictwem elektrycznym, co nadaje pracy zarówno charakter poznawczy, jak i wyraźny wymiar aplikacyjny.

Rozprawa ma jednoznacznie oryginalny charakter i wnosi istotny wkład do rozwoju badań nad syntetycznymi mikrostrukturami. Na szczególne podkreślenie zasługuje rozwinięcie i eksperymentalna walidacja mechanizmu elektrokapilarnego umożliwiającego formowanie jednocząstkowych łańcuchów poza objętością cieczy. Autor proponuje także odwrócony układ wykorzystujący menisk cieczy, który pozwala na bardziej powtarzalną i potencjalnie ciągłą produkcję mikrostruktur, co istotnie zwiększa atrakcyjność metody z punktu widzenia przyszłych zastosowań. Ważnym elementem pracy jest ilościowa analiza deformacji ściskającej zarówno pojedynczych cząstek, jak i całych łańcuchów, wsparta

symulacjami metodą elementów skończonych wykonanymi przy pomocy komercyjnego oprogramowania COMSOL. Uzyskane wyniki jednoznacznie pokazują, że mechaniczne ściskanie oraz zgrzewanie indukowane ciepłem Joule'a umożliwiają otrzymanie mikrościeżek o przewodności zbliżonej do materiału litego.

Autor posługuje się bardzo szerokim i spójnym warsztatem badawczym. W pracy wykorzystano autorskie stanowiska eksperymentalne do formowania łańcuchów cząstek, precyzyjne pomiary mechaniczne realizowane z użyciem reometrii i prób ściskania, a także pomiary właściwości elektrycznych, w tym oporności i charakterystyk prądowo-napięciowych. Uzupełnieniem badań eksperymentalnych są symulacje numeryczne obejmujące zagadnienia mechaniczne, elektrostatyczne oraz elektrotermiczne. Zastosowane metody są dobrze dobrane do postawionych celów badawczych, a ich opis jest na tyle szczegółowy, że umożliwia odtworzenie przeprowadzonych eksperymentów oraz analiz.

Tekst pracy jest obszerny, lecz dobrze uporządkowany. Pod względem formalnym konstrukcja rozprawy jest poprawna. Praca została napisana w języku angielskim. Część wprowadzająca i przeglądowa w sposób klarowny osadza przedstawione badania w kontekście aktualnego stanu wiedzy, a kolejne rozdziały prowadzą czytelnika w logiczny sposób od zagadnień fundamentalnych do aspektów aplikacyjnych. Na uwagę zasługuje bardzo dobra zgodność obserwacji eksperymentalnych z modelami teoretycznymi oraz umiejętne wykorzystanie modeli konstytutywnych do opisu zachowania materiału w warunkach dużych odkształceń. Autor w jasny sposób pokazuje, w jaki sposób deformacja mechaniczna prowadzi do ewolucji właściwości elektrycznych struktur, a sformułowane na tej podstawie zasady projektowania mogą być bezpośrednio wykorzystane przy wytwarzaniu przewodzących mikrościeżek. Interpretacja wyników świadczy o dobrym zrozumieniu badanych zjawisk fizycznych. Ilustracje, schematy i wykresy są czytelne i skutecznie wspierają narrację tekstu.

Oceniana rozprawa została podzielona na pięć głównych rozdziałów, do których załączono treści publikacji tworzących jednotematyczny cykl prac naukowych oraz dodatek techniczny. Szczegółowa lektura pokazuje, że jej układ rozdziałów jest przemyślany i konsekwentnie podporządkowany realizacji celów badawczych. W Rozdziale 1. Autor przedstawia szeroki i dobrze dobrany przegląd literatury dotyczącej formowania struktur koralikowych, ich właściwości oraz potencjalnych zastosowań. Wprowadzenie to nie ma charakteru jedynie opisowego, lecz pełni istotną funkcję analityczną, porządkując istniejące podejścia i jasno wskazując ich ograniczenia technologiczne. Szczególnie wartościowe jest omówienie mechanizmów elektrostatycznych i kapilarnych odpowiedzialnych za ekstrakcję cząstek z cieczy, które stanowi bezpośredni fundament dla dalszych rozważań i eksperymentów prowadzonych w pracy. Autor wykazuje się dobrą orientacją w literaturze przedmiotu i umiejętnie osadza własne badania w kontekście wcześniejszych osiągnięć.

Rozdział 2. poświęcony jest metodyce eksperymentalnej i stanowi jeden z mocnych elementów rozprawy. Autor szczegółowo opisuje autorskie stanowiska do formowania łańcuchów cząstek, zarówno w klasycznym układzie opartym na wyciąganiu łańcuchów koralikowych, jak i w bardziej zaawansowanym układzie odwróconym, opartym na pozyskaniu łańcucha z menisku, utworzonego przez zawiesinę. Opis ten obejmuje nie tylko

konfigurację aparatury, lecz także uzasadnienie doboru parametrów procesowych, takich jak napięcie, częstotliwość pola elektrycznego, prędkość wyciągania czy właściwości reologiczne cieczy. W dalszej części rozdziału Autor omawia metody pomiaru zmian kształtu cząstek i łańcuchów pod wpływem ściskania, techniki reologiczne oraz układy do pomiarów właściwości elektrycznych i zgrzewania oporowego. Rozdział jest napisany bardzo starannie, dzięki czemu możliwe jest odtworzenie przeprowadzonych eksperymentów – uważam to za ważny aspekt pracy.

W Rozdziale 3. Autor przedstawia zastosowane modele numeryczne i symulacje komputerowe realizowane metodą elementów skończonych. Omówione zostały zarówno modele mechaniczne, służące do analizy deformacji pojedynczych cząstek i całych łańcuchów, jak i modele elektrostatyczne oraz elektrotermiczne, wykorzystywane do opisu oddziaływań elektrycznych i procesów nagrzewania Joule'a. Na szczególne podkreślenie zasługuje konsekwentne powiązanie symulacji z danymi eksperymentalnymi oraz świadomy dobór modeli konstytutywnych, w tym modelu Johnsona–Cooka, który pozwala uwzględnić wpływ odkształcenia, prędkości odkształcenia i temperatury. Rozdział ten nie ogranicza się do prezentacji narzędzi obliczeniowych, lecz wnosi istotny wkład interpretacyjny, pozwalając lepiej zrozumieć rozkłady naprężeń, rozwój powierzchni styku koralików oraz mechanizmy odpowiedzialne za zmiany przewodnictwa.

Rozdział 4. stanowi syntetyczne omówienie publikacji składających się na rozprawę. Autor w sposób klarowny pokazuje powiązania tematyczne pomiędzy poszczególnymi artykułami oraz ich komplementarny charakter. Zabieg ten jest szczególnie istotny w przypadku rozpraw opartych na cyklu publikacji, gdyż pozwala czytelnikowi spojrzeć na przedstawione wyniki jako na spójną całość, a nie zbiór niezależnych prac.

W Rozdziale 5. Autor formułuje wnioski końcowe, które są zwięzłe, lecz jednocześnie dobrze osadzone w zaprezentowanych wcześniej wynikach. Wnioski te nie ograniczają się do prostego podsumowania rezultatów, lecz wskazują na ich znaczenie fizyczne oraz potencjał aplikacyjny. Autor trafnie identyfikuje również możliwe kierunki dalszych badań, co świadczy o dojrzałości naukowej i umiejętności krytycznej oceny własnej pracy.

Praca zawiera stosunkowo niewiele błędów typograficznych i nieścisłości, a dbałość o szczegóły edytorskie zasługuje na pochwałę. W kilku miejscach autor przytacza odniesienia do prac, których nie ma w bibliografii (np. odnośniki [37,38] na s. 9) lub błędnie odwołuje się do rysunków (Fig. 1(a) zamiast 3(a) na s. 19), itd., jednak nie zmienia to zasadniczego odbioru rozprawy. Pewne zdziwienie budzi dość uboga literatura, przytoczona we wstępie. Ponieważ jego celem jest pokazanie szerokiego kontekstu przeprowadzonych badań, które ze swej natury są interdyscyplinarne i mają szerokie potencjalne zastosowania, spodziewałbym się, że Doktorant we wstępie nakreśli nieco szerszy obraz podobnych badań. Nie jest to jednak kluczowe ze względu na bardzo szeroką literaturę przytoczoną w publikacjach, które stanowią podstawę omawianej rozprawy.

Praca mgr. Harkavyi oparta jest na cyklu pięciu publikacji naukowych, w tym artykułów opublikowanych w renomowanych czasopismach międzynarodowych. Wkład

doktoranta w powstanie poszczególnych prac jest jasno określony i znaczący, co jednoznacznie potwierdza jego samodzielność naukową oraz dojrzałość badawczą.

Pierwsza praca (Rozynek, **Harkavyi** & Giżyński, *Materials & Design*, 2022) stanowi fundament rozprawy, przedstawiając mechanizm formowania łańcuchów cząstek poza fazą ciekłą z wykorzystaniem oddziaływań elektrostatycznych i kapilarnych oraz wskazując potencjalne zastosowania takich struktur. Druga publikacja (Harkavyi, Tiwari & Rozynek, *Materials & Design*, 2025) rozwija metodę w kierunku większej powtarzalności i skalowalności poprzez uzyskiwanie łańcuchów z odwróconego menisku zawiesiny, co umożliwia precyzyjne sterowanie długością i pozycjonowaniem mikrostruktur. Trzecia praca (**Harkavyi**, Giżyński & Rozynek, *Soft Matter*, 2025) koncentruje się na mechanice deformacji mikrosfer wykonanych ze stopu lutowicznego oraz ich łańcuchów pod wpływem kompresji, łącząc eksperymenty z symulacjami metodą elementów skończonych (FEM). Wyniki te stanowią podstawę do zrozumienia ewolucji kontaktów między cząstkami i związanych z nimi zmian przewodnictwa. Czwarta publikacja (Rozynek, **Harkavyi**, Martinsen & Giżyński, *Materials & Design*, 2025) pokazuje bezpośrednie zastosowanie kompresji mechanicznej jako skutecznej metody post-processingu, prowadzącej do uzyskania ciągłych mikrościezek o bardzo niskiej rezystancji. Piąta praca, autorstwa zespołu Harkavyi, Solovan i Rozynek, będąca w przygotowaniu, uzupełnia cykl poprzez analizę alternatywnej drogi post-processingu, jaką jest zgrzewanie kontaktów w wyniku wydzielanego przy przepływie prądu ciepła Joule'a, umożliwiające trwałe połączenia przewodzące bez globalnego nagrzewania struktury. Cały cykl publikacji tworzy logiczną i konsekwentną całość, obejmującą zarówno mechanizmy formowania struktur, jak i ich właściwości oraz metody przekształcania w użyteczne mikrościezki przewodzące. Wspomniane prace zostały opublikowane w międzynarodowych i renomowanych czasopismach naukowych o wysokim współczynniku *impact factor* i uzyskały już ok. 10 cytowań (wg Google Scholar). Co ciekawe, mgr Harkavyi jest współautorem (jako drugi autor) dwóch innych prac – w czasopismach *Scientific Reports* oraz *Ultrasonics Sonochemistry* – które uzyskały kilkanaście cytowań i nie wchodzi w skład rozprawy, jednak podkreślają szerokie zainteresowania naukowe Doktoranta i jego umiejętność pracy w zespołach badawczych. Tak duży dorobek naukowy jest rzadko spotykany na tak wczesnym etapie kariery.

Uzupełnieniem zasadniczej części rozprawy są załączniki zawierające m.in. kody sterujące eksperymentami oraz szczegóły dotyczące automatyzacji symulacji numerycznych. Materiały te podnoszą przejrzystość badań i dodatkowo potwierdzają wysoki poziom techniczny wykonanej pracy.

Do najważniejszych wyników rozprawy zaliczam:

- 1) Wykazanie możliwości kontrolowanego formowania jednowymiarowych mikrostruktur o grubości pojedynczej cząstki poprzez współdziałanie sił elektrostatycznych i kapilarnych, oraz opracowanie metod ekstrakcji przewodzących mikrocząstek z menisku cieczy i budowy stabilnych łańcuchów poza fazą ciekłą. Zaproponowana metoda wytwarzania łańcuchów oparta na kontrolowanym wyciąganiu ich z menisku formowanego na końcu przewodzącego kanału umożliwia

ciągłe podawanie zawiesiny i precyzyjne pozycjonowanie powstałych mikrostruktur na podłożu.


- 2) Ilościowa analiza warunków i stabilności procesu formowania mikrościeżek z powstałych struktur, uwzględniająca wpływ rodzaju i geometrii podłoża, jego grubości oraz parametrów otoczenia, wsparta modelowaniem elektrostatycznym metodą elementów skończonych. Analiza deformacji sferycznych mikrocząstek oraz utworzonych z nich łańcuchów, obejmująca symulacje komputerowe FEM oraz wnikliwe badania eksperymentalne doprowadziła do sformułowania reguł projektowania przewodzących mikrościeżek, które mają potencjalnie szerokie zastosowania technologiczne.
- 3) Opracowanie i szczegółowa analiza dwóch metod wytwarzania mikrościeżek: poprzez mechaniczne ściskanie oraz zgrzewanie wskutek przepływu prądu elektrycznego. Z jednej strony Autor wykazał, że mechaniczne ściskanie stanowi skuteczną metodę post-processingu, przekształcającą struktury koralikowe w ciągłe, liniowe struktury o bardzo niskiej rezystancji poprzez zwiększenie pola kontaktu i plastyczną deformację plastyczną cząstek. Z drugiej strony, Autor zbadał i udokumentował alternatywny proces zgrzewania kontaktów poprzez ciepło Joule'a, w którym kontrolowany przepływ prądu prowadzi do lokalnego topnienia i wzrostu szyjek metalicznych w miejscach styku cząstek. Osiągnięcie przewodności mikrostruktur zbliżonej do przewodności litego materiału czyni opracowaną metodę realną alternatywą wobec technologii druku elektroniki opartych na tuszach zawierających nanocząstki i wysokotemperaturowym spiekaniu.
- 4) Stworzenie spójnych podstaw naukowych i technologicznych dla niskokosztowego wytwarzania funkcjonalnych przewodzących mikrościeżek, możliwych do nanoszenia na różnorodne, także nieregularne i elastyczne podłoża.

Moim obowiązkiem jako recenzenta jest również wskazanie pewnych niedoskonałości rozprawy. Podczas lektury nasunęły mi się następujące pytania i wątpliwości:

- a. Autor pokazuje bardzo przekonująco, że struktury po kompresji lub zgrzewaniu Joule'a osiągają wysoką przewodność, jednak w rozprawie brakuje szerszych testów trwałości w czasie, np. pod wpływem starzenia, utleniania, cykli temperaturowych czy wielokrotnego obciążania mechanicznego. Z punktu widzenia zastosowań w elektronice byłyby to istotne uzupełnienia.
- b. Choć Autor przedstawia zalety metody względem spiekania nanocząstkowych tuszy przewodzących, przydatne byłoby bardziej systematyczne porównanie z innymi technikami, zwłaszcza pod kątem rozdzielczości, wydajności i kosztów.
- c. W pracy dominują pomiary rezystancji przy przepływie prądu stałego (oraz jednej częstotliwości prądu zmiennego) i zagadnienia quasi-statyczne. Tymczasem w potencjalnych zastosowaniach elektronicznych interesujące byłoby również określenie impedancji i zachowania struktur w zakresie prądu zmiennego, gdzie periodyczna geometria łańcuchów może prowadzić do nietypowych efektów. Zagadnienia te nie są dostatecznie omówione.

- d. Zastosowanie modelu Johnsona–Cooka jest uzasadnione i daje dobrą zgodność z eksperymentem, jednak w przypadku stopów lutowniczych możliwe byłoby także odniesienie do bardziej wyspecjalizowanych modeli (np. Anand, wspomniany w pracy), szczególnie w kontekście procesów termicznych.
- e. Przedstawiony modelowy układ wykorzystuje stop lutowniczy, którego własności pozwalają z powodzeniem wdrożyć i scharakteryzować obie metody wytwarzania mikrościeżek. Choć Autor wspomina o potencjalnej uniwersalności metody, nie jest dla mnie jasne, w jakim stopniu metoda może być przeniesiona na inne materiały przewodzące lub dielektryczne? Dyskusja możliwych uogólnień znacznie podniosłaby atrakcyjność przedstawianych metod.
- f. Rozprawa skupia się na strukturach jednowymiarowych, co jest naturalne dla jej celu, jednak z perspektywy aplikacyjnej interesujące byłoby wskazanie, na ile możliwe jest przejście do bardziej złożonych układów sieciowych lub wielowarstwowych? Czy możliwe jest zastosowanie zaproponowanej metody do wytwarzania całych obwodów? Jakie są tutaj możliwości i ograniczenia projektowe?
- g. Rozprawa jest bardzo obszerna i momentami zawiera powtórzenia treści pomiędzy rozdziałami a streszczeniami publikacji, co jest typowe dla prac opartych na cyklu artykułów, ale mogłoby zostać lepiej skondensowane, aby oszczędzić czytelnikowi powtórnej lektury bardzo podobnych fragmentów.

Przytoczone powyżej wątpliwości i pytania nie zmieniają mojej ogólnej wysokiej oceny niniejszej rozprawy. Prezentuje ona oryginalne rozwiązanie istotnego problemu naukowego z dziedziny fizyki oraz inżynierii materiałowej, świadcząc zarazem o wysokich kompetencjach naukowych Autora i jego gotowości do prowadzenia samodzielnej pracy badawczej. Stwierdzam, że rozprawa doktorska pt. *Formation mechanisms of single-particle-thick microstructures and the physical properties of the structures formed* mgr. Yaroslava Harkavyi spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim zgodnie art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* i wnioskuję o dopuszczenie Doktoranta do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



dr hab. Maciej Lisicki, prof. UW