

prof. dr hab. Maria L. Ekiel-Jeżewska



Polska Akademia Nauk

Instytut Podstawowych Problemów Techniki

02-106 Warszawa, ul. Pawińskiego 5b, tel. (0-22) 827 46 92, 826 12 81 w. 164, fax: 826 96 15, <http://www.ippt.gov.pl/>

Warszawa, 9 marca 2026

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Yaroslava Harkavyi pod tytułem:**  
**“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”)**

**Przedstawienie rozprawy doktorskiej**

Rozprawa doktorska pod tytułem “Formation mechanisms of single-particle-thick microstructures and the physical properties of the structures formed” została przygotowana przez pana mgr. Yaroslava Harkavyi na Wydziale Fizyki i Astronomii Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne. Promotorem rozprawy jest dr hab. Zbigniew Rozynek, prof. UAM, a promotorem pomocniczym dr Konrad Giżyński.

Rozprawę doktorską stanowi praca pisemna składająca się z samodzielnej i wyodrębnionej części pracy zbiorowej, którą jest zbiór czterech opublikowanych i powiązanych tematycznie wieloautorskich artykułów naukowych, wydrukowanych w czasopismach o renomie międzynarodowej: trzy artykuły w *Materials & Design* (Impact Factor 7.9) oraz jeden artykuł w *Soft Matter* (Impact Factor 2.8), oraz jednego wieloautorskiego artykułu przygotowanego do wysłania do czasopisma naukowego. Artykuły poprzedzone są obszernym, 54-stronnicowym wprowadzeniem do tematyki i uzyskanych wyników, zawierającym odnośniki do literatury, a na końcu w dwóch dodatkach przedstawione zostały szczegóły oprogramowania użytego w eksperymentach i obliczeniach numerycznych. Rozprawa doktorska jest napisana w języku angielskim.

Część pracy zbiorowej stanowiącej rozprawę doktorską mgr. Yaroslava Harkavyi jest jasno wyodrębniona i samodzielna, o czym świadczą następujące fakty. Spośród pięciu artykułów rozprawy doktorskiej, w dwóch z nich Doktorant jest jedynym pierwszym autorem, a

w dwóch innych – jednym z dwóch pierwszych autorów. W każdym z tych artykułów zamieszczone zostały informacje o wkładach wszystkich współautorów. Dodatkowo, do rozprawy dołączone zostały podpisane oświadczenia wszystkich współautorów określające szczegółowo ich wkład w powstanie każdego z tych artykułów. Z powyższych materiałów jasno wynika, że mgr Yaroslav Harkavyi zaprojektował i przeprowadził znaczną część doświadczeń i opracował część metodologii eksperymentalnej, a także wykonał wszystkie symulacje numeryczne, a następnie przeprowadził analizę i opis znacznej części wyników doświadczalnych i numerycznych.

Wobec powyższych informacji stwierdzam, że forma rozprawy doktorskiej spełnia wymagania sprecyzowane w art. 187 ust. 3 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (zwanej dalej Ustawą). Zgodnie z komunikatem nr 19/2020 Rady Doskonałości Naukowej, w świetle art. 187 ust. 3 Ustawy dopuszczalne jest, aby rozprawa doktorska, jako praca pisemna, składała się po części z prac opublikowanych, jak i takich, których wyniki jeszcze nie zostały opublikowane.

Celem rozprawy doktorskiej pana mgr. Yaroslava Harkavyi jest zrozumienie, w oparciu o szczegółową analizę procesów fizycznych, mechanizmów tworzenia stabilnych mechanicznie wydłużonych łańcuchów cząstek o grubości ich średnicy oraz o oporze elektrycznym kontrolowanym powierzchnią elektrycznego kontaktu. W cyklu tematycznym pięciu artykułów uzyskane zostały następujące wyniki.

W artykule I opracowano metodę łączenia mikrocząstek przewodzących w jednowymiarowe długie łańcuchy. Dzięki siłom kapilarnym i obecności pola elektrycznego, cząstki wyciągane za pomocą elektrody do góry nad powierzchnię zawiesiny tworzyły w powietrzu liniowe łańcuchy o grubości jednej cząstki. W łańcuchy te udawało się skutecznie łączyć cząstki sferyczne o średnicach 20-500 mikrometrów, przy doborze odpowiednio dużej lepkości i małym przewodnictwie jonowym płynu.

W artykule II zaprezentowana została alternatywna metoda łączenia mikrocząstek przewodzących w jednowymiarowe długie łańcuchy. Zawiesinę mikrocząstek o średnicach w zakresie 100 – 400 mikrometrów umieszczono w pionowej rurce o średnicy 1 milimetra i pompowano ją w dół tak, aby na dole rurki stale tworzył się menisk wypukły, w którego cząstki były wyciągane do dołu poprzez działanie pionowego pola elektrycznego. W ten sposób w powietrzu tworzony był łańcuch cząstek przewodzących połączonych mostkami kapilarnymi lepkiej cieczy. Łańcuch ten odbierany był przez znajdujące się poniżej podłoże lub nawijany na obracający i przesuwający się poziomy walec, lub zawieszany jako połączenie dwóch oddzielnych elementów przewodzących. Pokazano, że tworzone łańcuchy można zginać bez ich

rozpadu na mniejsze fragmenty. Dla różnych parametrów układu wyznaczona została numerycznie wartość przyciągającej siły elektrycznej, użyta do optymalizacji układu doświadczalnego.

Artykuł III skoncentrowany jest na opisie fizycznym procesu mechanicznego ściskania łańcuchów cząstek przewodzących połączonych mostkami kapilarnymi lepkiej cieczy. Ściskanie miało na celu zwiększenie powierzchni kontaktu między tymi cząstkami, a ten sposób stworzenie trwałych mikroprzewodów elektrycznych. Przebadano zarówno proces ściskania pojedynczych cząstek, jak i ich łańcuchów. Przeprowadzono doświadczenia oraz obliczenia numeryczne. Wyznaczono zależność naprężenia od szybkości deformacji i temperatury.

Artykuł IV poświęcony jest ustaleniu ilościowej relacji między siłą ściskającą łańcuch mikrocząstek a jego plastycznym odkształceniem oraz przewodnictwem elektrycznym, stosując podgrzewanie lub nie stosując go. Analiza przeprowadzona została na podstawie doświadczeń i obliczeń numerycznych. Uzyskane wyniki pozwalają na tworzenie łańcuchów mikrocząstek przewodzących jako mikroprzewodów elektrycznych o pożądanej do zastosowań wartości oporu elektrycznego w zakresie trzech rzędów wielkości lub więcej, np. od  $1 \text{ m}\Omega$  do  $10 \Omega$  na  $1 \text{ mm}$  długości łańcucha przy średnicy cząstek ok. stu mikrometrów.

W artykule V przedstawiona została metoda elektrycznego spiekania cząstek lutu tworzących łańcuch utworzony jedną z metod opisanych w artykułach I – II. W wyniku przyłożenia pola elektrycznego, okolica kontaktu cząstek nagrzewa się, powodując powstanie przewodzących „szyjek” łączących sąsiednie cząstki. Sterując potencjałem pola elektrycznego, można zmieniać odpowiednio powierzchnię kontaktu sąsiednich cząstek, a w ten sposób kontrolować opór elektryczny łańcucha.

### **Pytania i komentarze**

1. Jaki jest obecnie status pracy nr V? DO jakiego czasopisma została wysłana i czy jest już przyjęta do publikacji?
2. Czy wytworzone wg opisanych w rozprawie procedur przewodzące łańcuchy cząstek znalazły już jakieś konkretne zastosowanie? Jeśli tak, to poproszę o szczegółowe przedstawienie tego zastosowania.
3. Czy używając metod opracowanych w rozprawie doktorskiej można tworzyć trwałe łańcuchy cząstek o właściwościach mechanicznych podobnych do sprężystych (zginających się i rozciągających) włókien o pewnym zakresie wartości modułu Younga?

## **Podsumowanie**

Niewątpliwie, rozprawa doktorska pana mgr. Yaroslava Harkavyi prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie nauki fizyczne, w zakresie tworzenia wydłużonych mikrostruktur cząstek przewodzących prąd elektryczny i opisu ich właściwości fizycznych, oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, dotyczącej eksperymentalnego i numerycznego wyznaczania mechanizmów fizycznych formowania wydłużonych mikrostruktur przewodzących prąd elektryczny o kontrolowanym oporze. Autor wykazał się znajomością wyników prac naukowych dotyczących tematyki rozprawy. Skonstruował, przetestował i zastosował własne programy numeryczne, zaprojektował i wykonał eksperymenty, opracował technologię łączenia mikrocząstek lutu, przez które przepuszczany jest prąd elektryczny. Krytycznie porównał własne wyniki z rezultatami zawartymi w literaturze. Ponadto, mgr Yaroslav Harkavyi wykazał się umiejętnością współpracy naukowej w zespole. A zatem rozprawa spełnia warunek sprecyzowany w art. 187 ust. 1 Ustawy.

Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, będące jednocześnie oryginalnym rozwiązaniem w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej. A mianowicie, mgr Yaroslav Harkavyi przeanalizował fizyczne podstawy: 1) procesu tworzenia jednowymiarowych łańcuchów sferycznych cząstek lutu wyciąganych z płynu za pomocą sił kapilarnych i sił elektrycznych; 2) procesu mechanicznej stabilizacji tych łańcuchów i tworzenia trwałych złącz elektrycznych między sąsiednimi cząstkami łańcucha, poprzez ściskanie, podgrzewanie lub przepuszczanie prądu elektrycznego. Na podstawie wyników doświadczeń i przeprowadzonych symulacji numerycznych opracował technologię wytwarzania łańcuchów mikrocząstek o kontrolowanym oporze elektrycznym. Łańcuchy takie mogą mieć potencjalnie wiele zastosowań w mikrouządzeniach sterowanych elektrycznie. Spełniony jest zatem warunek określony w ust. 2 art. 187 Ustawy.

## **Wniosek końcowy**

Biorąc pod uwagę powyższe podsumowanie mojej recenzji, wnoszę o przyjęcie rozprawy doktorskiej pana mgr. Yaroslava Harkavyi i dopuszczenie Go do publicznej jej obrony. Ponadto wnoszę o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.

Uzasadnienie wniosku o wyróżnienie jest następujące. Wyniki uzyskane przez Doktoranta są wyjątkowe; łączą bowiem badania podstawowe w zakresie fizycznych z zastosowaniami inżynierskimi, a badania eksperymentalne wsparte są obliczeniami

numerycznymi. Pan mgr Yaroslav Harkavyi przeprowadził analizę procesów fizycznych istotnych przy tworzeniu łańcuchów mikrocząstek przewodzących prąd elektryczny, co pozwoliło na optymalizację ich właściwości mechanicznych i elektrycznych, oraz opracowanie efektywnej technologii ich produkcji. Co więcej, wyniki przedstawione w rozprawie doktorskiej zostały zaprezentowane w aż pięciu artykułach, z których cztery zostały już opublikowane w czasopiśmie naukowym o renomie międzynarodowej, a piąty został przygotowany do wysłania do publikacji.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Marek Gutierrez', written in a cursive style.

