

mgr Yaroslav Harkavyi
streszczenie rozprawy doktorskiej
pt: „Formation mechanisms of single-particle-thick microstructures and the physical
properties of the structures formed.

Tworzenie struktur mikroskopowych o grubości pojedynczej cząstki stanowi istotne wyzwanie badawcze. Istniejące metody wytwarzania takich struktur koralikowych mają co najmniej jedno ograniczenie – są mało wydajne, kosztowne lub wymagają zaawansowanej i bardzo drogiej infrastruktury badawczej, w tym pomieszczeń o kontrolowanej czystości powietrza (ang. *cleanroom*). Ponadto, metody te – w większości o charakterze akademickim – są nieskomercjalizowane, nieuprzedmiotowione i rzadko pozwalają na uzyskanie struktur, które są jednocześnie precyzyjnie pozycjonowane i łatwe do wykorzystania na podłożach.

Niniejsza rozprawa koncentruje się na badaniu mechanizmów fizycznych leżących u podstaw formowania jednowymiarowych mikrostruktur oraz ich dalszej obróbki prowadzącej do powstania trwałych, wysoce przewodzących mikrościeżek. Praca łączy analizę zjawisk fundamentalnych – takich jak oddziaływania siłowe, niestabilności oraz reakcję materiału – z wynikami obserwacji eksperymentalnych i efektami procesowymi.

Praca rozpoczyna się od wykazania, że pole elektryczne, wspomagane przez siły kapilarne, może inicjować ekstrakcję przewodzących mikrocząstek z cieczy, prowadząc do formowania wolnostojących łańcuchów o grubości pojedynczej cząstki, powstających poza fazą ciekłą. Systematyczne eksperymenty pozwoliły określić warunki, w których proces ten przebiega najefektywniej, oraz ujawniły role dwóch rodzajów mostków kapilarnych obecnych w układzie: mostka cząstka-menisk, który kontroluje etap ekstrakcji, oraz mostka cząstka-cząstka, odpowiedzialnego za stabilizację łańcucha po wyłączeniu pola. Uzyskane wyniki wyznaczają uniwersalne i niskokosztowe podejście do wytwarzania jednowymiarowych struktur mikroskopowych oraz potwierdzają możliwość ich zastosowania jako przewodzących mikrościeżek.

Następnie wprowadzono bardziej skalowalny wariant metody, oparty na kontrolowanym wyciąganiu cząstek z menisku dyspersji utworzonego na końcówce przewodu, pełniącego jednocześnie funkcję elektrody. Ciągłe dostarczanie cząstek do menisku umożliwia precyzyjne sterowanie długością formowanego łańcucha oraz jego pozycją pomiędzy meniskiem a podłożem. Modelowanie elektrostatyczne z wykorzystaniem metody elementów skończonych pozwoliło ilościowo określić siłę przyciągania pomiędzy pierwszą cząstką a podłożem oraz wyjaśniło, w jaki sposób materiał, grubość i geometria podłoża, a także wilgotność otoczenia wpływają na inicjację i stabilność procesu.

Aby przekształcić wytworzone łańcuchy w funkcjonalne przewodniki, niniejsza praca łączy eksperymenty z symulacjami metodą elementów skończonych. Analiza deformacji ściskającej została przeprowadzona najpierw na pojedynczych mikrocząstkach lutowia, w celu kalibracji parametrów modelu dla bardziej złożonych przypadków, a następnie na całych łańcuchach. Uzyskane pomiary i wyniki symulacji odwzorowują zależność siła-przemieszczenie, wzrost powierzchni kontaktu oraz przepływ plastyczny w odpowiednich skalach. Pozwoliło to na sformułowanie zasad projektowych umożliwiających dostrajanie pola kontaktu między mikrocząstkami w strukturze koralikowej, co bezpośrednio wpływa na jej właściwości elektryczne oraz ewolucję kształtu.

Zbadano dwa komplementarne sposoby obróbki łańcuchów: (i) mechaniczne ściskanie oraz (ii) zgrzewanie ciepłem Joule'a przy dostarczaniu ustalonej kontrolowanej mocy. Oba podejścia przeanalizowano eksperymentalnie i z użyciem komputerowych symulacji (Metoda Elementów Skończonych) zarówno mechanicznych, jak i elektrotermicznych. Ściskanie przekształca koralikowe łańcuchy w ciągłe mikrościeżki o niskiej rezystancji na różnych podłożach, stanowiąc alternatywę dla spiekania tuszy z nanocząstek. Z kolei zgrzewanie Joule'a, uzyskane przez przyłożenie określonej mocy do układu, wywołuje szybki, lokalny wzrost sztywności w miejscach kontaktu. W rezultacie obie metody pozwalają przekształcić nietrwałe łańcuchy o grubości pojedynczej cząstki w trwałe ścieżki o przewodności zbliżonej do materiału litego.

Niniejsza rozprawa jest zorganizowana w następujący sposób. Rozdział 1 przedstawia przegląd metod formowania, właściwości oraz sposobów obróbki końcowej struktur koralikowych, a także wprowadza modele materiałowe niezbędne do opisu deformacji ściskającej. Rozdział 2 szczegółowo opisuje techniki eksperymentalne dotyczące wyciągania łańcuchów, charakteryzacji geometrycznej, reologii, rezystancji elektrycznej i spiekania elektrycznego. Rozdział 3 przedstawia symulacje komputerowe obejmujące kompresję mechaniczną, rezystancję elektryczną, nagrzewanie oporowe (Joule'a) oraz przyciąganie elektrostatyczne, w tym geometrię, modele fizyczne, siatki i analizy. Rozdział 4 podsumowuje publikacje stanowiące podstawę niniejszej rozprawy i omawia ich wzajemne powiązania tematyczne. Rozdział 5 przedstawia główne wnioski wynikające z przeprowadzonych badań. Rozdział 6 zawiera zestawienie wykorzystanej literatury. W rozdziale 7 zaprezentowano pełne wersje manuskryptów, natomiast rozdział 8 obejmuje oświadczenia współautorów dotyczące ich wkładu w poszczególne publikacje.