

Prof. dr hab. inż. Małgorzata Jakubowska  
Wydział Mechaniczny Technologiczny  
Politechnika Warszawska

Warszawa, 26.02.2026

## **RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

Pana Mgr Mateusza Łysień

### **pt. Metal Nanoparticles in Additive Manufacturing of Conductive Features at the Micrometer Scale by Precise Deposition Method**

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr Mateusza Łysień pt. „Metal Nanoparticles in Additive Manufacturing of Conductive Features at the Micrometer Scale by Precise Deposition Method” wykonana została jako doktorat wdrożeniowy w firmie XTPL. Promotorem rozprawy jest prof. Wiesław Stręk.

Rozprawa została napisana w języku angielskim. Praca liczy 280 stron, składa się z 13 rozdziałów. Rozprawę kończy Karta Technologiczna, spis dorobku Doktoranta oraz spis referencji - 342 pozycje. Niestety rozprawa nie została wydana w formie książkowej, co zwykle jest praktykowane, nawet przy doktoratach objętych tajemnicą. Utrudnia to znacznie czytanie i ocenę rozprawy.

Rozprawa jest rozbudowana w sposób ponad standardowy i w mojej ocenie część zagadnień można było przedstawić w sposób bardziej zwarty, a niektóre wyniki można by umieścić w załączniku.

Tym nie mniej charakteryzuje się przejrzystą strukturą, właściwą dla prac doktorskich, a więc po sformułowaniu problemu, mamy bardzo rozbudowaną część przeglądu literaturowego, dalej część eksperymentalna (od str. 82-189), zakończona wnioskami.

Problematyka rozprawy mieści się w obszarze szeroko rozumianej elektronice drukowanej, obszarze, który rozwija się obecnie niezwykle szybko. Związane jest to z rozwojem Internetu Rzeczy (IoT), który w połączeniu ze sztuczną inteligencją AI jest uważany za czwartą rewolucję przemysłową. Elektronika drukowana, nazywana czasem „drukowaną inteligencją” (Printed Intelligence”) służy do wytwarzania hardware dla IoT. Są one wytwarzane różnymi technikami drukarskimi, aby zapewnić ich opłacalność ekonomiczną. Wymagają jednak specjalnych materiałów, past i atramentów, opartych najczęściej na nanomateriałach, przez co prowadzone w tym obszarze badania są wyjątkowo interdyscyplinarne i łączą w sobie wiele dziedzin: chemię, fizykę, inżynierię materiałową, elektronikę, a także inżynierię mechaniczną.

Stąd praca przedstawiona przez Doktoranta jest bardzo aktualna, potrzebna i stanowi istotny wkład w rozwój obszaru elektroniki drukowanej. Autor opracował technologię wytwarzania zarówno nanoproszków srebra i miedzi, które następnie zostały zastosowane jako faza funkcjonalna w opracowanych oryginalnych atramentach służących do wytwarzania ścieżek przewodzących techniką natryskiwania przez specjalne dysze, co zostało opatentowane przez Firmę XTPL. Przedstawiona praca mieści się w dyscyplinie nauki chemiczne, bowiem wytwarzanie proszków metali metodami chemicznymi jest jak najbardziej związane z rozwojem technologii chemicznych i w pełni wpisuje się w rozwój tej dyscypliny.

Układ rozprawy nie jest typowy, ale klarowny. Pierwszy rozdział to o jednostronicowy wstęp dotyczący dziedziny, w której umiejscowiona jest praca (elektroniki drukowanej). Drugi rozdział, również jednostronicowy, określa cel pracy, którym jest opracowanie technologii nanoszenia drukiem bezkontaktowym bardzo precyzyjnych wzorów drukarkami zawierającymi głowice opracowane przez firmę XTPL. Wymagało to opracowania bardzo specyficznych atramentów zawierających nanoproszki metali zawieszane w odpowiednich polimerach, metody ich spiekania, a także charakteryzację wytworzonych warstw.

W rozdziale trzecim (strony 10-20) doktorant opisuje standardowe techniki stosowane w elektronice drukowanej, co w moim odczuciu można by pominąć. Natomiast rozdział 4 i 5 (strony 21-25) dotyczy już technik będących przedmiotem rozprawy, mianowicie technik ultra precyzyjnego osadzania warstw stosowanych w firmie XTPL.

Rozdział 6 i 7 (34-81) obejmuje szeroką i dogłębną analizę metod wytwarzania nanomateriałów, ze szczególnym uwzględnieniem proszków nanometali, mechanizmów ich wytwarzania, otrzymywania past i atramentów oraz ich utwardzania. Ten fragment rozprawy jest pogłębioną analizą literaturową, jaką zwykle zawiera rozprawa doktorska.

Od rozdziału 8-11 (strony 83-139) rozpoczyna się opis części eksperymentalnej, w której Autor przedstawia wyniki prac eksperymentalnych obejmujących opracowanie metod syntezy nanoproszków srebra i miedzi, bardzo szczegółowe scharakteryzowanie właściwości tych proszków, a następnie opracowanie technologii past i atramentów oraz badanie ich właściwości, zakończonych wytworzeniem z nich warstw i ich zbadanie. Ten fragment rozprawy uważam za wykonany bardzo starannie, co świadczy o wysokich umiejętnościach doktoranta prowadzenia badań i zaawansowanym warsztacie.

Rozdział 12 to przedstawienie uzyskanych rezultatów i dyskusja wyników. Obejmuje ona zarówno otrzymane różne rodzaje proszków srebra i miedzi o różnej wielkości ziaren, które dodatkowo nie tworzą aglomeratów. Pokazano także sposób tworzenia atramentów, oraz spiekania warstw. Przedyskutowano mechanizmy tych procesów, co świadczy o wysokich umiejętnościach Doktoranta i właściwym podejściu do eksperymentu.

Za największe osiągnięcie Doktoranta uważam, opracowanie sposobu wytwarzania nanoproszków srebra i miedzi o bardzo wąskim rozrzucie wielkości ziaren i dodatkowo w sposób kontrolowany. Świadczy to o wysokich umiejętnościach prowadzenia badań przez Autora i stanowi osiągnięcie w skali światowej. Dodatkowo zastosowanie ich do atramentów nanoszonych techniką bezkontaktową rozpylania z dyszy o specjalnej konstrukcji i bardzo małym przekroju stanowi istotny wkład w rozwój elektroniki

drukowanej. Wyniki te zostały wdrożone w firmie XTPL. Rozprawa zawiera także kartę technologiczną wyrobu. A więc spełnione są warunki doktoratu wdrożeniowego.

Pewnym niedostatkim, w moim odczuciu jest brak pokazania sposobu dochodzenia do opracowanych technologii, będących rezultatem doktoratu. Jednakże, nie wpływa to na moją wysoką ocenę pracy.

Wyniki Autora zostały opublikowane w dwóch artykułach, w tym w jednym w bardzo prestiżowym czasopiśmie z pierwszego decyla, w którym Doktorant jest pierwszym autorem oraz sześciu artykułach pokonferencyjnych. Ponadto Doktorant jest współtwórcą 3 patentów międzynarodowych oraz trzech zgłoszeń patentowych, co jest pożądane w doktoratach wdrożeniowych. Potwierdza to wysoki poziom rozprawy i potwierdza jej wkład w rozwój elektroniki drukowanej.

Reasumując stwierdzam, że cel pracy został osiągnięty, a recenzowana rozprawa posiada wysoki poziom naukowy i stanowi istotny wkład w rozwój dyscypliny nauki chemiczne. Biorąc pod uwagę powyższe oraz szerokie spektrum przeprowadzonych badań, ich nowatorskość i potrzebę rynkową stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr Mateusza Łysień pt. „Metal Nanoparticals in Additive Manufacturing of Conductive Features at the Micrometer Scale by Precise Deposition Method” spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki i wnoszę o dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.

M. Plumbard