



Wroclaw, 19.02.2026 r.

Dr hab. inż. Joanna Olesiak-Bańska, prof. PWr
Politechnika Wroclawska
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wroclaw
joanna.olesiak@pwr.edu.pl
+48 071 320 2436

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Mateusza Łysienia
zatyulowanej: : „Metal nanoparticles in additive manufacturing of conductive features
at the micrometer scale by Precise Deposition method”
przygotowanej pod opieką prof. Wiesława Stręka**

Postęp w miniaturyzacji układów scalonych wymaga opracowania coraz bardziej precyzyjnych i wysokorozdzielczych metod druku. Metoda ultraprecyzyjnego dozowania (ultra-precise dispensing, UPD) opracowana przez XTPL zaspokaja tę potrzebę. Technika ta stawia jednak specyficzne wymagania dotyczące właściwości fizykochemicznych tuszu, które trudno spełnić za pomocą tuszów komercyjnych. Obecnie dostępne tusze charakteryzują się częstym zatykaniem dysz i słabą drukowalnością, zwłaszcza w przypadku stosowania urządzeń drukujących XTPL. W pracy doktorskiej mgr Łysień podejmuje się rozwiązania tego problemu i opracowania własnego tuszu dedykowanego do urządzeń drukujących XTPL, charakteryzującego się wysoką stabilnością i drukowalnością. Jest to interesujący problem do rozwiązania z punktu widzenia fizyki i chemii, ponieważ główne ograniczenia do pokonania wynikają z właściwości fizykochemicznych i reologicznych tuszów komercyjnych, które należy przezwyciężyć dzięki przemyślanemu projektowaniu składu tuszu. Tylko wtedy drukowanie ultracienkich elementów metalowych będzie możliwe, a zalety metody UPD zostaną w pełni wykorzystane.

Rozprawa doktorska mgr Łysienia to 232-stronicowy dokument składający się z dwóch głównych części: „Przeładowej” i „Eksperymentalnej”. Pierwsza część składa się z



rozdziałów: Wstęp, Motywacja oraz innych, które stanowią przegląd zagadnień z zakresu elektroniki drukowanej. Druga część składa się z rozdziałów dotyczących syntezy nanocząstek, metod charakteryzacji, technologii produkcji i kontroli jakości. Po nich następują rozdziały „Wyniki i dyskusja” oraz „Wnioski”. Ostatnią część pracy stanowi karta techniczna, lista publikacji i patentów, a także bibliografia. Temat i zakres pracy doktorskiej zostały poprawnie sformułowane i spełniają wymagania strukturalne rozprawy doktorskiej.

Pierwszy rozdział, „Wstęp”, zawiera przegląd na temat metody UPD opracowanej przez XTPL oraz wyzwań związanych z przygotowaniem tuszu dostosowanego do urządzeń drukujących XTPL. Po „Wstępie” następuje część „Motywacja”, w której mgr Łysień przedstawia listę 10 kamieni milowych, jakie realizował w czasie pracy badawczej na doktoracie. Kamienie milowe rozpoczynają się od syntezy nanocząstek – głównego składnika tuszu, przechodzą przez rozwój receptur tuszu i testy na urządzeniach drukujących, aż po optymalizację procesu drukowania, obróbkę końcową i charakteryzację wytworzonych linii przewodzących. Zakres zadań jest odpowiedni dla rozprawy doktorskiej, a kolejność, poziom złożoności i liczba proponowanych kroków są logiczne i dostosowane do celu końcowego, który jest jasno zdefiniowany na początku akapitu (cel: „opracowanie kompletnej metody produkcji i kontroli jakości tuszów na bazie metalicznych nanomateriałów, dedykowanej głowicom drukującym zaprojektowanym przez firmę XTPL”). Następnie autor opisuje koncepcje elektroniki drukowanej i metod bezpośredniego osadzania, które niosą ze sobą wyraźne korzyści dla wytwarzania elastycznej elektroniki i produkcji niskokosztowej. Szczególny nacisk kładzie się na wytwarzanie addytywne struktur metalowych. W kolejnych rozdziałach opisano ultraprecyzyjne dozowanie (UPD) z XTPL, które jest unikalną technologią bezpośredniego osadzania, łączącą drobne cechy nadruku z tuszami o wysokiej lepkości. Metoda UPD działa na podłożach przewodzących i nieprzewodzących, również niepłaskich, i oferuje mikrometrowe rozmiary cząstek. Mgr Łysień przedstawia również możliwe zastosowania metody UPD, które potwierdzają spodziewane szerokie zainteresowanie przemysłu optymalizacją tuszu proponowanego w ramach rozprawy.

Kolejne akapity wprowadzają w tematykę nanocząstek metali, szeroko opisując metody syntezy metodami mokrej chemii oraz szczegółowo opisując proces nukleacji i wzrostu. Następnie przedstawiono technologię tuszów i past przewodzących, gdzie opisano elementy



tuszu i wymagania dotyczące właściwości fizykochemicznych (np. dobra przyczepność do podłoża, dobra trwałość, wysoka przewodność przy najniższych liniach nadruku). Omówiono takie cechy, jak lepkość, napięcie powierzchniowe, lotność, wielkość cząstek, stężenie i stabilność, a także wyjaśniono parametry reologiczne, które zostaną następnie zmierzone w celu oceny tuszów przygotowanych w ramach rozprawy. Ważne akapity dotyczą tuszów srebrnych i miedzianych, już opisanych w literaturze, które stanowią podstawę dalszych prac mgr Łysienia. W niniejszym rozdziale wprowadzającym mgr Łysień wykazuje dobrą znajomość najnowocześniejszych rozwiązań w dziedzinie elektroniki drukowanej, metod syntezy nanocząstek metali, metod nanoszenia tuszu oraz wytwarzania precyzyjnych struktur metalowych. W sumie cytowane są 343 pozycje literaturowe z odpowiednim opisem. W tym miejscu pomocne byłoby dodanie informacji jakie właściwości nanocząstek i metody ich syntezy są wymagane konkretnie dla tematu pracy (UPD z głowicami drukującymi XTPL). Biorąc pod uwagę szeroko opisaną literaturę, podsumowanie głównych wniosków w kontekście specyficznych wymagań materiału badanego w pracy byłoby bardzo przydatne dla czytelnika, ponieważ w obecnej formie potrzeba tak obszernego przeglądu literatury jest nieco niejasna (np. po co opisano metody syntezy, które w żadnym wymiarze nie byłyby stosowane w pracy: hydrotermalne, wspomagane mikrofalami itp.?). Aby wykorzystać tę wiedzę, pojawia się pytanie – w jakich aspektach metody te mogą być korzystne lub słabsze w porównaniu z syntezami przeprowadzonymi przez autora?

Następny rozdział („Eksperymentalny”) poświęcony jest *(fragment wyłączony w związku z odniesieniem do treści objętej tajemnicą prawnie chronioną)*

Lista publikacji i patentów mgr Łysienia liczy 8 publikacji (w większości są to materiały pokonferencyjne IEEE czy SID symposium), i jeden oryginalny artykuł naukowy, w którym mgr Łysień jest głównym i pierwszym autorem (tekst publikacji jest też załączony do doktoratu). Dodatkowo, mgr Łysień jest współautorem 6 zgłoszeń patentowych w USA (5 jako pierwszy autor), co jest znaczącą liczbą na tym etapie kariery naukowej. Dorobek publikacyjny i zgłoszenia patentowe mgr Łysienia potwierdzają innowacyjność badań prowadzonych przez autora i zaawansowany poziom możliwości wdrożenia wyników tych badań.



Podsumowując, rozprawa doktorska zawiera oryginalne rozwiązanie problemu naukowego w zakresie elektroniki drukowanej i przygotowania tuszów o pożądanym właściwościach fizykochemicznych. Zaprezentowane wyniki, jak też strona edytorska rozprawy, są wysokiej jakości i potwierdzają wiedzę mgr Łysienia i umiejętność prowadzenia pracy naukowej. Wnioski płynące z badań mgr Łysienia mogą wzbudzić duże zainteresowanie badaczy i technologów zajmujących się inżynierią materiałową, fizyką i chemią w zakresie elektroniki drukowanej. Część rezultatów jest już obecnie opublikowana w artykule naukowym (M. Łysień et al., Sci. Report 2022). Dlatego stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji praca doktorska spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim. Na tej podstawie wnoszę o dopuszczenie Kandydata do dalszych etapów postępowania.

Joanna Olesiak-Bańska