

Gliwice, 04.07.2025 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Wojciecha Łąpy

**pt. " Wpływ parametrów procesu na mikrostrukturę i właściwości ścieżek przewodzących
na bazie srebra wykonanych techniką drukowania strumieniem aerozolu"**

zrealizowanej pod kierunkiem

promotora dr. hab. inż. Leszka Łatki

promotora pomocniczego dr. hab. inż. Marcina Winnickiego

Podstawą opracowania recenzji jest pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej Pana prof. dr. hab. inż. Zbigniewa Gronostajskiego z dnia 23 kwietnia 2025 r., pismo nr W10/RDND07/128/2025.

1. Zakres i aktualność tematu rozprawy

Mgr inż. Wojciech Łąpa realizował dysertację, której badania zostały wykonane w ramach projektu pt. „*Sonic Jet precyzyjna drukarka do wytwarzania elastycznej elektroniki*”, finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w programie LIDER. Doktorant podejmuje bardzo ambitne zadanie polegające na opracowaniu nowatorskiego stanowiska badawczego umożliwiającego prowadzenie badań nad metodą kompleksowego wytwarzania ścieżek przewodzących na bazie srebra na podłożach elastycznych z wykorzystaniem technologii natryskiwania strumieniem aerozolu.

Proces natryskiwania strumieniem aerozolu, tzw. druk aerozolowy, stanowi jedną z najnowszych technologii addytywnych wykorzystywanych do tworzenia obwodów drukowanych, w tym w szczególności prototypowania oraz drukowania na niestandardowych podłożach. Aktualnie, szczególnie istotnym kierunkiem badawczym rozwoju tej technologii jest wytwarzanie ścieżek przewodzących na podłożach z materiałów elastycznych. Wynika to z faktu, iż postęp w tym zakresie warunkuje dynamikę rozwój najnowszej generacji urządzeń elektronicznych, wykorzystujących tzw. elementy elastycznej elektroniki.

Biorąc pod uwagę aktualność, aspekty naukowe i znaczenie praktyczne postawionego przez Doktoranta problemu, należy uznać wybór tematu rozprawy za trafny i uzasadniony. Ponadto, tematyka rozprawy wpisuje się zarówno w aktualne kierunki rozwoju Inżynierii Mechanicznej jako dyscypliny, jak i rozwoju nowoczesnych urządzeń do wytwarzania elementów elastycznej elektroniki.

2. Ocena strony formalnej rozprawy

Praca została zredagowana na 177 stronach z zachowaniem klasycznej struktury dla prac w dziedzinie nauk technicznych, zawierając dwie zasadnicze części: analizę stanu zagadnienia w świetle literatury oraz opis badań własnych wraz z analizą wyników i wnioskami. Na początku pracy znajduje się streszczenie w języku polskim i angielskim, spis treści oraz wykaz stosowanych skrótów. Praca składa się z 6 rozdziałów zawierających 164 rysunki i 5 tabel oraz spisu literatury. Spis literatury cytowanej w rozprawie obejmuje 237 pozycji w tym jedną pracę Doktoranta. Większość cytowanych artykułów z czasopism jest aktualna, wydana w ostatnich 15 latach.

W części analizy literatury, liczącej 58 stron, opisano kluczowe zagadnienia dotyczące tematyki pracy. Część badawcza pracy, zawierająca cel pracy i jej tezę, a także metodykę badawczą oraz wyniki badań wraz z analizą i wnioskami końcowymi, została zredagowana na 89 stronach.

Od strony formalnej należy ocenić pozytywnie redakcję pracy, przy czym można jednak zauważyć sporą ilość błędów stylistycznych, interpunkcyjnych oraz innych redakcyjnych. Ponadto, Doktorant nie ustrzegł się błędów terminologicznych, błędnych sformułowań oraz stosowania skrótów myślowych, co znacznie utrudnia lekturę dysertacji.

3. Ocena merytoryczna pracy

Cześć literaturowa pracy jest integralnie związana z jej tematem i została oparta na przeglądzie pozycji literaturowych dotyczących kluczowych aspektów wytwarzania ścieżek przewodzących na podłożach elastycznych z wykorzystaniem technologii natryskiwania strumieniem aerozolu.

W rozdziale 1 Doktorant przedstawia obszary zastosowania oraz perspektywę rozwoju elementów elastycznej elektroniki, jak również krótko charakteryzuje podstawowe metody ich wytwarzania.

Rozdział 2 zawiera aktualny stan wiedzy w zakresie wpływu poszczególnych etapów procesu wytwarzania ścieżek przewodzących z wykorzystaniem technologii natryskiwania strumieniem aerozolu na ich właściwości geometryczne i elektryczne. W tym celu Doktorant analizuje proces

atomizacji tuszu oraz parametry pracy głowicy drukującej decydujące o kształtowaniu strumienia aerozolu w kontakcie z podłożem, a w konsekwencji właściwościach geometrycznych natryskiwanych ścieżek. Analizowane są również mechanizmy schnięcia tuszów zawierających nanocząstki srebra, zarówno na etapie kropli w strumieniu aerozolu jak i po osadzeniu na natryskiwanej powierzchni. Ponadto, Doktorant zawiera obszerny opis etapu spiekania ścieżek przewodzących, uwzględniając wpływ metod spiekania oraz składów chemicznych tuszów stosowanych do wytwarzania elementów elastycznej elektroniki na finalne właściwości elektryczne wytwarzanych ścieżek.

Część badawczą pracy otwiera rozdział 3, w którym Doktorant w oparciu o lakoniczne podsumowanie analizy stanu zagadnienia określa luki badawcze w zakresie podejścia do badań nad metodą kompleksowego wytwarzania ścieżek przewodzących z wykorzystaniem technologii natryskiwania strumieniem aerozolu, jak również metodyki oceny jakości wytwarzanych ścieżek przewodzących. W rezultacie Doktorant wskazuje na konieczność modyfikacji konstrukcji istniejących podzespołów urządzeń do natryskiwania strumieniem aerozolu uwzględniającej właściwości najnowszych tuszów na bazie srebra. Wspomniana modyfikacja ma dotyczyć podzespołów odpowiedzialnych zarówno za generowanie aerozolu oraz kształtowanie parametrów strumienia aerozolu w kontakcie z natryskiwany podłożem, jak również podzespołów decydujących o warunkach utwardzania ścieżek, w tym etapu suszenia i spiekania. Ponadto, Doktorant uzasadnia konieczność uzupełnienia przyjętej w literaturze metodyki oceny jakości ścieżek przewodzących o badania klimatyczne.

W oparciu o wspomnianą analizę stanu zagadnienia Doktorant sformułował cel badawczy pracy, a następnie tezę pracy:

Cel: „Zbadanie wpływu rodzaju oraz parametrów spiekania na końcowe właściwości ścieżek przewodzących wykonanych z użyciem techniki natryskiwania strumieniem aerozolu”.

Teza: „Poprzez odpowiednią konstrukcję i geometrię dyszy istnieje możliwość uzyskania ścieżek przewodzących o szerokości mniejszej niż 200 μm na foliach polimerowych naniesionych techniką drukowania strumieniem aerozolu”.

W mojej opinii, Doktorant w pierwszej kolejności powinien sformułować tezę pracy, a dopiero potem określić główne i szczegółowe cele pracy, pozwalające na udowodnienie sformułowanej tezy. Ponadto, zarówno cel jak i teza pracy są sformułowane niefortunnie gdyż cel dotyczy jedynie badania etapu utwardzania ścieżek przewodzących, natomiast teza ogranicza się jedynie do badania etapu procesu natryskiwania ścieżek. Odzwierciedlenie wskazanego wcześniej

kompleksowego podejścia do badania procesu wytwarzania ścieżek przewodzących, w tym analizy zjawisk zachodzących zarówno na etapie procesu natryskiwania ścieżek jak i podczas etapu ich suszenia i spiekania, Doktorant zawarł dopiero w programie badawczym przedstawionym schematycznie na rys. 63. Na uwagę zasługuje fakt, iż program badawczy uwzględniał m.in. opracowanie koncepcji oraz budowę nowatorskiego stanowiska do badań nad metodą kompleksowego wytwarzania ścieżek przewodzących, a zatem wyposażonego zarówno w moduł do drukowania ścieżek z wykorzystaniem technologii natryskiwania strumieniem aerozolu jak również moduły umożliwiające suszenie i spiekanie ścieżek bezpośrednio po procesie natryskiwania.

Szczegółowy opis procesu konstruowania nowatorskiego stanowiska badawczego, z uzasadnieniem doboru charakterystyki poszczególnych podzespołów, został przedstawiony w rozdziale 4. Ponadto rozdział 4 zawiera podstawowe informacje o zastosowanych w badaniach materiałach, w tym materiale elastycznego podłoża oraz trzech rodzajach komercyjnie dostępnych tuszów na bazie srebra. Zastosowanie w badaniach materiału elastycznego podłoża w postaci folii z poliimidu o grubości 100 μm jest dobrze uzasadnione na różnych etapach badań w pracy. Jednakże Doktorant nie uzasadnia warunków doboru tuszów, jak również nie podaje ich składów chemicznych. W rozdziale 4 znajduje się również opis technik i metod badawczych zastosowanych do oceny jakości wytwarzanych ścieżek przewodzących.

Rozdział 5 zawierający dalszy opis procesu konstruowania podzespołów stanowiska badawczego oraz badań wpływu wybranych parametrów procesowych na jakość wytwarzanych ścieżek przewodzących, został podzielony na 9 podrozdziałów.

W podrozdziale 5.1 Doktorant przedstawia opis badań nad optymalizacją procesu generacji aerozolu, obejmujących opracowanie projektów i wykonanie dwóch rodzajów generatorów aerozolu: ultradźwiękowego i pneumatycznego. Ocenę funkcjonalności opracowanych generatorów aerozolu pod względem stopnia i jednorodności atomizacji dla trzech wybranych w pracy tuszów, Doktorant wykonał stosując oryginalną metodykę pomiarów, zawierającą zasadniczo dwie techniki badawcze oraz analizę statystyczną. Jednakże opis zastosowanych technik badawczych obejmujący również informacje zawarte na rys. 75 i 76 nie precyzuje warunków uzyskiwania danych, jak również możliwych dokładności pomiarowych.

Podrozdział 5.2 zawiera opis badań nad optymalizacją konstrukcji głowicy drukującej, w tym geometrii dyszy natryskującej oraz parametrów procesu natryskiwania dla trzech rodzajów tuszów. Brak jest jednak opisu procedury (kryteriów) doboru średnicy dyszy natryskującej. W rezultacie, dla jednej przyjętej średnicy dyszy natryskującej, Doktorant przeprowadził analizę wpływu wybranych

parametrów procesowych na jakość drukowanych ścieżek. W tym celu opracowany został niestandardowy plan badań dla procesu natryskiwania strumieniem aerozolu uwzględniający wyznaczenie wpływu stosunku ciśnień gazu nośnego do osłonowego (nazwanego w pracy stosunkiem ciśnień oraz współczynnikiem skupienia) na szerokość drukowanych ścieżek, przy niezmienniej prędkości drukowania. W konserwacji nie jest możliwe bezpośrednio odniesienie uzyskanych danych do tych dostępnych w literaturze, które bazują na optymalizacji parametrów pracy głowicy drukującej poprzez dobór współczynnika skupienia, definiowanego jako stosunek natężeń przepływu gazu osłonowego do nośnego. Ponadto, Doktorant nie wskazuje optymalnego zakresu badanych parametrów procesu natryskiwania dla opracowanej głowicy drukującej oraz testowanych tuszów.

Dalsza część podrozdziału 5.2 dotyczy analizy możliwych metod suszenia i spiekania wydrukowanych ścieżek w aspekcie ich integracji z procesem natryskiwania, a tym samym opracowania finalnej koncepcji nowatorskiego stanowiska do kompleksowego wywarzania ścieżek przewodzących na podłożach elastycznych.

Podrozdział 5.3 opisuje przebieg badań nad doбором warunków utwardzania ścieżek przewodzących na opracowanym stanowisku badawczym, w tym etapu suszenia z wykorzystaniem podgrzewanego stołu oraz etapu spiekania fotonicznego z wykorzystaniem źródła promieniowania w zakresie bliskiej podczerwieni. Metodyka oceny wpływu ww. warunków utwardzania na jakość ścieżek przewodzących zawierała pomiar profilu ścieżek z użyciem mikroskopu konfokalnego oraz analizę powierzchni ścieżek z wykorzystaniem skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM) oraz mikroskopii sił atomowych (AFM). Niestety, analizę uzyskanych na tym etapie wyników badań utrudnia brak informacji o zastosowanych parametrach procesu natryskiwania testowanych ścieżek.

W podrozdziale 5.4 Doktorant przeprowadził oryginalne badania wpływu temperatury natryskiwanego podłoża, na proces zwilżania oraz suszenia kropli tuszu o objętości 0,01 ml. W celu zapewnienia powtarzalnej objętości osadzanych kropli wybranych tuszów, Doktorant opracował dodatkowe oprzyrządowanie stanowiska badawczego, zawierające własnej konstrukcji pompę strzykawkową. Wykonany zakres badań umożliwił określenie wpływu temperatury natryskiwanego podłoża oraz czasu schnięcia osadzonej objętości tuszu na powstawanie porowatości oraz pęknięć w trakcie etapu jego spiekania. Na podstawie uzyskanych wyników Doktorant opracował procedurę suszenia oraz spiekania natryskiwanych ścieżek przewodzących. Opracowana procedura została zastosowana do wytworzenia serii ścieżek testowych, których właściwości geometryczne zostały porównane z właściwościami ścieżek spiekanych konwencjonalnie w piecu. Jednakże Doktorant nie

precyzuje parametrów procesu natryskiwania zastosowanych do wytworzenia ww. serii ścieżek testowych, jak również nie są znane warunki procesu spiekania konwencjonalnego w piecu.

Podrozdziały od 5.5 do 5.8 zawierają zasadniczo opis właściwości wytworzonych ścieżek testowych wg. opracowanej przez Doktoranta procedury suszenia i spiekania, określonych na podstawie odpowiednio pomiarów oporności, testów klimatycznych, pomiarów przewodności elektrycznej oraz nanotwardości. Przedstawiony w ww. podrozdziałach zakres badań właściwości ścieżek dostarcza interesujące dane, do których w szczególności można zaliczyć uzyskane na podstawie analizy przekrojów ścieżek z wykorzystaniem mikroskopii sił atomowych oraz pomiarów nanotwardości.

Podrozdział 5.9 dotyczy badania przyczepności wytwarzanych ścieżek przewodzących metodą siatki nacięć, zgodnie z normą ISO 2409. Przeprowadzanie testów przyczepności wymagało opracowania techniki wykonania próbek testowych uwzględniających specyfikę przyjętej metody badawczej. Podobnie jak w poprzednich podrozdziałach Doktorant nie precyzuje parametrów procesu natryskiwania zastosowanych do wytworzenia próbek do testów przyczepności. Nie są znane również warunki ich suszenia i spiekania.

Rozdział 6 zawiera skromne około dwustronicowe podsumowanie wyników badań oraz 8 wniosków, w których Doktorant wymienia przede wszystkim najważniejsze użytkowe osiągnięcia pracy.

Podsumowując ocenę merytoryczną stwierdzam, że zawarty w recenzowanej pracy doktorskiej proces tworzenia koncepcji oraz budowy nowatorskiego stanowiska badawczego integrującego głowicę drukującą z modułami odpowiedzialnymi za suszenie i spiekanie wydrukowanych ścieżek, a w rezultacie umożliwiającego badania metody kompleksowego wytwarzania ścieżek przewodzących, świadczy o nieprzeciętnych kompetencjach Doktoranta w projektowaniu urządzeń do wytwarzania drukowanych elementów elektroniki. Z kolei, procedury suszenia i spiekania ścieżek bezpośrednio po procesie natryskiwania opracowane z wykorzystaniem zbudowanego stanowiska badawczego są niewątpliwie wkładem Doktoranta w rozwój kompleksowej metody wytwarzania ścieżek przewodzących na podłożach elastycznych. Pomimo, pewnych braków wskazanych w recenzji, rozprawa doktorska mgr. inż. Wojciecha Łąpy stanowi **oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej.**

4. Uwagi do pracy i pytania do dyskusji

Analiza treści rozprawy doktorskiej nasuwa szereg uwag i pytań wynikających z nieściśności i „niedoskonałości”, których nie udało się Doktorantowi uniknąć na etapie redakcji pracy. Część uwag dotyczy stylu pisania, w tym niejasnych stwierdzeń czy błędnych sformułowań, część dotyczy niedoprecyzowanych opisów, błędów terminologicznych czy niewłaściwych symboli jednostek bądź ich braku. Ponadto, pewnym deficytem pracy jest brak czytelnego i szczegółowego przedstawiania parametrów technicznych stosowanych urządzeń, wartości stosowanych parametrów procesowych, w tym ich planu badawczego, jak również dokumentacji uzyskanych wyników badań. Biorąc pod uwagę dużą ilość analizowanych warunków i parametrów procesowych, jak również szerokie spektrum badanych właściwości wytwarzanych ścieżek przewodzących, wymagających określenia konkretnych wartości liczbowych, niezrozumiałą jest brak przedstawienia ww. danych w postaci tabelarycznej. Mam nadzieję, że Doktorant w kolejnej działalności publikacyjnej swoich dokonań naukowych poprawi formę prezentacji, a zatem skuteczność przekazu informacji. Jednakże, powyższe uwagi, dotyczące przede wszystkim sposobu przekazu osiągnięć badawczych rozprawy, nie obniżają jej wartości naukowej.

Oceniając pozytywnie rozprawę doktorską kieruję do Doktoranta kilka pytań i uwag do dyskusji:

1. Jakie były kryteria doboru tuszów?
2. Proszę przybliżyć obie techniki pomiarowe stosowane w metodyce pomiarów stopnia i jednorodności atomizacji tuszu, w tym cytuję autora pracy „algorytm odczytujący średnice kropli z podłoża polimerowego”.
3. Na czym polegał proces doboru średnicy dyszy natryskującej i jakie uwzględniał kryteria?
4. Dlaczego optymalizacja parametrów procesu natryskiwania ścieżek opracowaną głowicą drukującą nie uwzględniała doboru standardowego współczynnika skupienia, definiowanego jako stosunek natężeń przepływu gazu osłonowego do nośnego?
5. Jakie przesłanki zadecydowały o zastosowaniu tylko jednej prędkości drukowania przy optymalizacji parametrów procesu natryskiwania skonstruowaną głowicą drukującą?
6. Czy można wskazać parametry pracy skonstruowanej głowicy drukującej potwierdzające wyższość opracowanego rozwiązania nad dostępnymi aktualnie na rynku.
7. Opis procedury badawczej nie zawiera istotnego parametru procesu natryskiwania, a mianowicie odległości dyszy drukującej od podłoża. Jaka była wartość tego parametru i czy podlegała optymalizacji?

8. Na wielu zdjęciach przedstawiających widok lica natryskanych ścieżek szerokość strefy rozprysku jest różna z obu stron ścieżki (np. rys. 94, 96, 97). Asymetrię strefy rozprysku można dostrzec również na profilach uzyskanych na mikroskopie konfokalnym (rys. 119 i 120). Z czego wynika ta asymetria?
9. Opis badań wpływu warunków utwardzania wytwarzanych ścieżek przewodzących na ich właściwości (badane w podrozdziałach do 5.2 do 5.9) nie zawiera informacji o zastosowanych optymalnych parametrach procesu natryskiwania. Ponadto, warunki spiekania piecowego nie zostały precyzyjnie określone, jak również nie ma informacji o kryteriach ich doboru.
10. Na czym polegał sposób przeniesienia wyników uzyskanych w badaniu procesu zwilżania oraz suszenia kropli tuszu o objętości 0,01 ml w specyfikę suszenia natryskiwanych ścieżek? Czy opracowany został model bądź algorytm uwzględniający różnice w objętościach osadzanego w obu przypadkach tuszu?
11. Czy wprowadzenie dodatkowego warunku technologicznego jakim była temperatura podgrzewania wstępnego podłoża nie wymagało rozważenia dalszej optymalizacji parametrów procesu natryskiwania ścieżek, w tym prędkości drukowania?

5. Podsumowanie i wniosek końcowy.

Podsumowując, uzyskane w opiniowanej rozprawie doktorskiej wyniki badań są interesujące i wartościowe, tak z uwagi na ich poznawczy charakter, jak również ze względu na znaczenie użyteczne. Pan mgr inż. Wojciech Łapa wykazał się predyspozycjami do samodzielnego planowania i prowadzenia badań naukowych oraz opracowania i analizy uzyskanych wyników.

W związku z powyższym stwierdzam, że praca doktorska Pana mgr. inż. Wojciecha Łapy pt. "Wpływ parametrów procesu na mikrostrukturę i właściwości ścieżek przewodzących na bazie srebra wykonanych techniką drukowania strumieniem aerozolu" spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w ustawie *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* z dnia 20.07.2018 r. i wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Damian Jasiński