



dr hab. inż. Michał Bembenek, prof. AGH  
Akademia Górniczo-Hutnicza  
im. Stanisława Staszica w Krakowie  
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki  
Katedra Systemów Wytwarzania

Kraków, 25 czerwca 2025r.

## **RECENZJA**

**rozprawy doktorskiej mgra inż. Wojciecha Łapy  
pt. „Wpływ parametrów procesu na mikrostrukturę i właściwości ścieżek  
przewodzących na bazie srebra wykonanych techniką drukowania strumieniem aerozolu”**

### **1. Podstawa opracowania recenzji**

Podstawą wykonania recenzji jest pismo o sygnaturze W10/RDN07/126/2025 skierowane od prof. Zbigniewa Gronostajskiego – Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej z dnia 25.04.2025 r. oraz rozprawa doktorska.

Postępowanie prowadzone jest zgodnie z Ustawą „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” z dnia 20 lipca 2018 r. (Dz. U. z 2023 r. poz. 742).

### **2. Ogólne informacje o Kandydacie**

Mgr inż. Wojciech Łapa ukończył studia magisterskie na kierunku Automatyka i Robotyka na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej w 2020 roku. Już w trakcie nauki aktywnie angażował się w działalność badawczo-rozwojową, uczestnicząc jako wykonawca w projekcie Narodowego Centrum Badań i Rozwoju pt. „Otrzymywanie precyzyjnych struktur z proszków na bazie proszków żelaza”. Projekt ten zakładał opracowanie drukarki pracującej w technologii Powder Bed Fusion. Po ukończeniu studiów rozpoczął kształcenie w Szkole Doktorskiej Politechniki Wrocławskiej. Jego dorobek obejmuje współautorstwo czterech

publikacji naukowych oraz dwóch zgłoszeń patentowych. W 2021 roku dołączył do kolejnego projektu finansowanego przez NCBiR – „Sonic Jet – precyzyjna drukarka do elastycznej elektroniki”, który bezpośrednio nawiązuje do tematyki jego pracy doktorskiej. Obszary zainteresowań badawczych doktoranta obejmują technologie addytywne, drukowaną elektronikę, nanomateriały i funkcjonalne powłoki. Obecnie pracuje jako Młodszy Specjalista Techniczny Automatyk w Dziale Technicznego Planowania firmy PCC Rokita.

### **3. Celowość podjęcia tematu**

Przedstawiona do recenzji praca porusza istotny i aktualny problem związany z rozwojem elastycznej elektroniki, skupiając się na innowacyjnej technice – drukowaniu strumieniem aerozolu ang. *Aerosol Jet Printing* (AJP). Tematyka ta zyskuje coraz większe znaczenie zarówno w obszarze badań podstawowych, jak i w praktyce przemysłowej, m.in. w takich dziedzinach jak elektronika noszona, inteligentne opakowania czy drukowanie struktur funkcjonalnych. W tym kontekście rozprawa wpisuje się w kierunek badań inżynierskich wspierających postęp w nowoczesnych technologiach budowy maszyn, materiałowych i metodach produkcji.

Rynek elastycznej elektroniki wykazuje dynamiczny rozwój, co znajduje potwierdzenie w literaturze i prognozach branżowych. Elastyczna elektronika znajduje zastosowania m.in. w: elektronice ubieralnej, inteligentnych opakowaniach, systemach monitorowania zdrowia czy komponentach IoT i RFID. Rozwijanie technologii umożliwiających jej precyzyjne i skalowalne wytwarzanie, jak drukowanie strumieniem aerozolu, jest więc szczególnie istotne. Technologia AJP, będąca głównym przedmiotem rozprawy, należy do najnowszych metod bezpośredniego druku struktur przewodzących. W odróżnieniu od klasycznych metod (np. sitodruk, ink-jet), AJP pozwala na drukowanie z wysoką rozdzielczością, umożliwia pracę z tuszami o szerokim zakresie lepkości, pozwala na druk na powierzchniach trójwymiarowych, co otwiera nowe możliwości aplikacyjne. W tym kontekście rozprawa wpisuje się w kierunek badań inżynierii mechanicznej wspierając postęp w nowoczesnych technologiach wytwarzania przyrostowego i metodach produkcji.

### **4. Charakterystyka rozprawy**

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska składa się ze 177 stron. Zawiera ona sześć rozdziałów i dopełniona jest przez wykaz używanych w rozprawie skrótów, wykaz definicji

określeń użytych w rozprawie, spis literatury, streszczenie w języku polskim oraz w języku angielskim. W skład pracy wchodzi 237 pozycji literatury w tym jedna autorstwa doktoranta, 5 tablic oraz 164 rysunki. Rozprawa doktorska mgr inż. Wojciecha Łapy pt. „Wpływ parametrów procesu na mikrostrukturę i właściwości ścieżek przewodzących na bazie srebra wykonanych techniką drukowania strumieniem aerozolu” została zorganizowana w sposób logiczny i przejrzysty, od ogólnych zagadnień rynkowo-technologicznych po szczegółowe wyniki badań i wnioski. Całość rozprawy podzielona została na sześć głównych rozdziałów, z których każdy pełni istotną funkcję w konstrukcji pracy. Rozdział pierwszy – Wprowadzenie – przedstawia kontekst i aktualność podjętej tematyki. Autor opisuje dynamiczny rozwój rynku elastycznej elektroniki, podkreślając potencjał zastosowań technologii drukowanych struktur przewodzących, zwłaszcza w urządzeniach ubieralnych, inteligentnych opakowaniach i miniaturowych czujnikach. Wskazuje także na ograniczenia tradycyjnych metod wytwarzania i argumentuje zasadność badań nad techniką AJP jako obiecującą alternatywą. Wprowadzenie zawiera również klasyfikację metod druku oraz ich zestawienie z technologią AJP. Rozdział drugi stanowi szczegółowy przegląd literatury i podstaw teoretycznych związanych z drukiem strumieniem aerozolu. Autor wyjaśnia fizyczne mechanizmy tworzenia i transportu aerozolu, charakteryzuje przepływy w mikrodyszach oraz siły działające na krople w obrębie kanału przepływowego. Przedstawione są tu również aspekty skupiania aerodynamicznego, problematyka rozprysku i oceny jakości ścieżek, a także różnice między generatorami aerozolu (ultradźwiękowym i pneumatycznym). Rozdział ten ma charakter interdyscyplinarny, łącząc wiedzę z zakresu mechaniki płynów, mikrofluidyki, materiałoznawstwa i elektroniki drukowanej. W rozdziale trzecim – Cel, teza i zakres pracy – autor formułuje główny cel rozprawy, którym jest analiza wpływu parametrów procesu AJP oraz spiekania na mikrostrukturę i właściwości ścieżek przewodzących wykonanych z tuszy srebrnych. Przedstawia również tezę badawczą i szczegółowy zakres realizacji pracy, obejmujący budowę prototypowego stanowiska, testy tuszy, spiekania oraz analizę właściwości uzyskanych struktur. Rozdział czwarty – Metodyka badań – opisuje szczegółowo zaprojektowane i wykonane stanowisko badawcze oraz zastosowane metody pomiarowe. Wśród narzędzi wykorzystanych do badań znalazły się m.in. mikroskopia konfokalna i skaningowa (SEM), techniki analizy obrazów, testy przewodnictwa elektrycznego, nanoindentacja i testy środowiskowe. Najobszerniejszy rozdział piąty – Część eksperymentalna – przedstawia wyniki przeprowadzonych badań. Obejmuje on testy generatorów

aerozolu, analizę morfologii ścieżek (w tym dla konkretnego tuszu 6N), wpływ objętości materiału na jakość druku, badania zależności między szerokością ścieżek a ich oporem oraz eksperymenty klimatyczne i mechaniczne. Autor przedstawił również wpływ różnych metod spiekania (piec, NIR, stół grzewczy) na jakość i przewodność ścieżek. Rozdział szósty – Podsumowanie wyników i wnioski – syntetyzuje uzyskane wyniki oraz potwierdza postawioną tezę. Autor jednoznacznie wykazuje, że parametry procesu AJP (takie jak ciśnienia gazów, geometria dyszy, metoda spiekania) mają istotny wpływ na jakość struktur przewodzących. Zidentyfikowano warunki pozwalające na minimalizację rozprysku i uzyskanie struktur o wysokiej przewodności. Wskazano także kierunki dalszych badań.

Całość rozprawy cechuje się wysokim poziomem merytorycznym, solidnym opracowaniem metodycznym oraz oryginalnością podejścia.

## **5. Ocena merytoryczna rozprawy**

Rozprawa doktorska mgr inż. Wojciecha Łapy pt. „Wpływ parametrów procesu na mikrostrukturę i właściwości ścieżek przewodzących na bazie srebra wykonanych techniką drukowania strumieniem aerozolu” reprezentuje wysoki poziom merytoryczny, zarówno pod względem zakresu przeprowadzonych badań, jak i ich wartości poznawczej oraz potencjału aplikacyjnego. Praca podejmuje aktualne i istotne zagadnienie związane z technologiami wytwarzania w dziedzinie elastycznej elektroniki, która stanowi jeden z najszybciej rozwijających się sektorów współczesnej inżynierii materiałowej i elektronicznej.

Zagadnienie drukowania strumieniem aerozolu (AJP) zostało potraktowane kompleksowo – od szczegółowego przeglądu literatury, przez analizę zjawisk fizycznych towarzyszących procesowi generacji i transportu aerozolu, po zaawansowane badania eksperymentalne. Autor wykazał się bardzo dobrą znajomością tematu, precyzyjnie identyfikując obszary wymagające optymalizacji, takie jak geometria dyszy, proporcje gazów, parametry spiekania czy warunki środowiskowe. Szczególną wartością stanowi własnoręcznie zaprojektowane i skonstruowane stanowisko badawcze, co świadczy o dużej samodzielności i dojrzałości badawczej doktoranta.

Metodyka badań została dobrana trafnie i dostosowana do postawionych celów. Autor wykorzystał szereg nowoczesnych technik pomiarowych i analitycznych (SEM, mikroskopia konfokalna, nanoindentacja, analiza obrazowa), a także opracował własne algorytmy przetwarzania danych i oceny jakości ścieżek. Rzetelność podejścia badawczego potwierdza fakt

zebrania i opracowania dużych zbiorów danych (ponad 80 tysięcy pomiarów), co zapewniło wiarygodność uzyskanych wyników.

Na uwagę zasługuje interdyscyplinarność pracy – łączy ona elementy inżynierii mechanicznej, mikrofluidyki, elektroniki drukowanej i technologii materiałowej. Wysoka jakość analizy została utrzymana także w części interpretacyjnej – autor trafnie wyciąga wnioski, wskazując bezpośrednie korelacje między parametrami procesu a właściwościami uzyskanych struktur. Podkreślenia wymaga również zastosowanie autorskich kryteriów oceny jakości ścieżek oraz uwzględnienie uwarunkowań przemysłowych, co nadaje pracy wymiar aplikacyjny.

Rozprawa jest poprawna również pod względem struktury logicznej i językowej. Każdy rozdział został jasno zdefiniowany, a narracja prowadzona jest w sposób spójny i przejrzysty. Podsumowania i wnioski są dobrze uargumentowane, a perspektywy dalszych badań przedstawiono realistycznie i celnie.

Podsumowując, rozprawa mgr inż. Wojciecha Łapy zasługuje na wysoką ocenę merytoryczną. Praca nie tylko spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim, ale także wyróżnia się innowacyjnością, dojrzałością badawczą i dużym potencjałem wdrożeniowym. Autor wykazał się wiedzą, kompetencjami technicznymi i umiejętnością prowadzenia badań naukowych na wysokim poziomie.

## **6. Uwagi krytyczne**

Choć rozprawa mgr inż. Wojciecha Łapy pt. „Wpływ parametrów procesu na mikrostrukturę i właściwości ścieżek przewodzących na bazie srebra wykonanych techniką drukowania strumieniem aerozolu” reprezentuje wysoki poziom merytoryczny, można sformułować kilka krytycznych uwag, które nie umniejszają wartości pracy, lecz wskazują na możliwe kierunki jej doskonalenia:

1. Ograniczony zakres materiałowy. Praca koncentruje się na tuszach zawierających nanocząstki srebra, co jest uzasadnione z punktu widzenia wysokiej przewodności, jednak nie uwzględniono porównania z innymi potencjalnie obiecującymi materiałami, takimi jak nanodrut srebrowy, grafen, nanorurki węglowe czy tusze na bazie miedzi. Uwzględnienie przynajmniej jednej alternatywy zwiększyłoby wartość porównawczą pracy.
2. Wąskie ujęcie trwałości eksploatacyjnej. Choć przeprowadzono badania klimatyczne i nanoindentację, nie podjęto szerzej tematu degradacji długoterminowej czy odporności

ścieżek na cykliczne obciążenia mechaniczne (np. zginanie, skręcanie), które są kluczowe w zastosowaniach elastycznej elektroniki. Testy typu „bending fatigue” byłyby wartościowym uzupełnieniem.

3. Potencjalna możliwość uproszczenia struktury tekstu. Fragmenty teoretyczne, zwłaszcza w rozdziale 2, zawierają bardzo szczegółowe opisy sił, równań i zjawisk fizycznych, co jest niewątpliwie cenne, ale chwilami może zacierać przejrzystość tekstu. Niektóre z tych partii mogłyby zostać skrócone bez utraty wartości merytorycznej.
4. Błędy stylistyczne, ortograficzne, składniowe oraz gramatyczne. W rozprawie można odnaleźć dość dużo błędów tych typów np. „Zależność oporności do szerokości ścieżek” (str. 6, str. 131), „bezpośrednio na podłożu” (str. 14), „Możliwe jest również za pomocą ładunku kontrolować sposób” (str. 16), „Rozważając skale mikrometryczne średnicy” (str. 19), „Kryterium A ma za zadaniem wykrywać miejsca” (str. 27), 2,23E+17; 5,13e+16; 3,18e+14; 1,02E+17 (str. 42), „Kolejnym ważnym aspektem jest schnięcie zawieszyny pod kątem.” (str. 46), „obserwujemy zjawisko znanego jako efekt plamy kawy” (str. 47), „Często jest to proces zależny nie tylko od parametrów samego procesu,” (str. 48), w tabeli na stronie 65 są kropki zamiast przecinków, „nie kontaktowej belki” (str. 81), „zbadana została mikroskopem elektronowym SEM (Tescan VEGA 3 SBH, Brno, Republika Czeska) wyposażona w detektory SE i BSE” (str. 81), „Na problemy z pękaniem można również napotkać się w literaturze.” (str. 102), „temperatur stołu powyżej 80° Celsjusza wygląd” (str. 117), „Struktura ta cechują się”(str. 123), „oraz w celach porównawczych spiekane w piecu. wykonano pomiary szerokości ścieżki.” (str. 131), „oraz ponownie zmierzono opór w celach porównawczy.” (str. 136).

Powyższe uwagi mają charakter konstruktywny i dotyczą przede wszystkim możliwego rozszerzenia lub pogłębienia badań. Nie świadczą o słabościach pracy, lecz raczej wskazują potencjalne kierunki dalszego rozwoju i uzupełnień. Rozprawa pozostaje wartościową i solidnie opracowaną pracą doktorską, której jakość można jeszcze podnieść w kolejnych etapach kariery naukowej lub wdrożeniowej autora.

## **7. Wniosek końcowy**

Usterki wymienione w powyższej recenzji nie obniżają w istotny sposób poziomu dysertacji. Rozprawa prezentuje wymaganą ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata w dyscyplinie „Inżynieria mechaniczna” oraz dowodzi umiejętności prowadzenia pracy naukowej w tej dyscyplinie. Jej pozytywne aspekty i znaczące w tym zakresie osiągnięcia Doktoranta pozwalają na stwierdzenie,

że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Wojciecha Łapy pt. „Wpływ parametrów procesu na mikrostrukturę i właściwości ścieżek przewodzących na bazie srebra wykonanych techniką drukowania strumieniem aerozolu” jest rozwiązaniem oryginalnym, dotyczącym przyrostowych technik wytwarzania, wnoszącym znaczący wkład w dyscyplinę „Inżynieria mechaniczna”. Przedstawione rozwiązanie problemu naukowego oraz przesłanki do zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze komercyjnej, spełniają wymagania formalne określone w art. 187. Ust. 1 Ustawy z dnia 20.07.2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 poz. 1668) przez co uzasadnione jest nadanie Kandydatowi stopnia naukowego doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

**Wnoszę więc o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.**

A handwritten signature in brown ink, appearing to read "Michal Bentkiewicz". The signature is fluid and cursive, with a long horizontal stroke at the end.