

dr hab. inż. Katarzyna Matras-Postolek, prof. PK
Wydział Inżynierii i Technologii Chemicznej
Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków
k.matras@pk.edu.pl, tel. +48 126283059

Kraków, 24.08.2023 r.

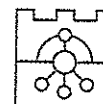
Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr inż. Bartłomieja Podsiadły
pt. „*Opracowanie i badania właściwości materiałów kompozytowych do
wytwarzania obwodów elektroniki strukturalnej technikami przyrostowymi*”

I. Podstawa opracowania

Podstawę formalną sporządzenia niniejszej recenzji stanowi pismo Pana prof. dr hab. inż. Tomasza Stareckiego, Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Automatyki, Elektroniki, Elektrotechniki i Technologii Kosmicznej Politechniki Warszawskiej z dnia 27 czerwca 2023r. Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska została wykonana na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej, pod opieką promotora dr hab. inż. Marcina Słomy, profesora uczelni.

II. Dane o kandydacie

Mgr inż. Bartłomiej Podsiadły jest absolwentem Politechniki Warszawskiej na Wydziale Mechatroniki. Od kilku lat jest związany z grupą badawczą dr hab. inż. Marcina Słomy, prof. PW gdzie był wykonawcą m.in. projektu First Team pt. „*Heterofazowe materiały funkcjonalne dla elektroniki strukturalnej*” finansowanego przez Fundację na rzecz Nauki Polskiej. Doktorant jest autorem i współautorem 11 publikacji naukowych, z których jedna opublikowana w wydawnictwie Springer (*Journal of Materials Science: Materials in Electronics [P1]*) oraz pięć pozostałych opublikowanych w czasopismach typu open access z wydawnictwa MDPI (*Nanomaterials [P3], Materials [P5], Applied Sciences-Base [P6 i P9], Micromachines [P11]*), stanowi podstawę osiągnięcia naukowego rozprawy doktorskiej. Listę dorobku zamyka spis 5 materiałów konferencyjnych, z których K1, K4 i K5 jest ściśle powiązanych z tematyką pracy doktorskiej. Wszystkie prace Doktoranta były cytowane 74 razy (bez autocytowań), według bazy Scopus na dzień 23.08.2023 r., Indeks Hirsha wynosił 4. Jest to dobry wynik jak na tak wczesny etap kariery naukowej. Na końcu rozprawy Doktorant

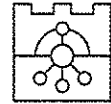


przedstawił wymagane prawem oświadczenia współautorów potwierdzające Jego dominujący wkład w przygotowanie wyżej wymienionych publikacji. Ponadto, pragnę tu zaznaczyć, że w czterech publikacjach i materiałach konferencyjnych Doktorant jest pierwszym i korespondencyjnym autorem. Świadczy to o dużej Jego samodzielności, który nie tylko musiał wykonać większość prac laboratoryjnych ale również uczestniczył we wszystkich etapach procesu przygotowania publikacji naukowej. W pracy doktorskiej brak jest dodatkowych informacji na temat pozostałych osiągnięć Doktoranta.

III. Wybór tematyki badawczej, cel, układ rozprawy doktorskiej, zastosowane piśmiennictwo, ocena merytoryczna przedstawionych wyników

Technologia druku 3D, znana również jako drukowanie addytywne lub przyrostowe, przyczyniła się do rewolucji w sposobie wytwarzania przedmiotów i komponentów. Zasadniczą cechą tej technologii jest tworzenie trójwymiarowych obiektów, na podstawie cyfrowego modelu komputerowego, poprzez nakładanie warstw materiału w procesie przyrostowym. Technologia druku 3D dzięki zdolności do precyzyjnego tworzenia złożonych geometrii, znalazła zastosowanie w wielu dziedzinach nauki i techniki m.in. w medycynie, w przemyśle lotniczym i motoryzacyjnym, w architekturze. Przykładowo w medycynie druk 3D umożliwia tworzenie spersonalizowanych protez, implantów i modeli anatomicznych do celów chirurgicznych, co wpływa pozytywnie na poprawę jakości życia pacjentów. Z kolei, w architekturze druk 3D pozwala na szybkie i elastyczne tworzenie prototypów budynków oraz elementów architektonicznych, co wspiera innowacje w procesie projektowania. Duże nadzieje wiąże się również z technologią druku 3D w optoelektronice i elektronice, gdzie precyzja druku pozwala na wytwarzanie coraz mniejszych urządzeń z zachowaniem lub poprawą ich sprawności.

Jak pokazują ostatnie światowe badania naukowe, technologia druku 3D, choć ma ogromny potencjał i zdolność do transformacji wielu sektorów przemysłu, posiada również wiele ograniczeń i wyzwań. Głównym czynnikiem determinującym dalszy rozwój tej technologii jest opracowanie metod wytwarzania nowych materiałów do druku, w tym materiałów kompozytowych o kontrolowanych właściwościach elektrycznych. Niejednokrotnie, jakość wydruków zależy od użytych materiałów oraz ich właściwości, co podkreśla potrzebę stałego badania i rozwoju tego typu materiałów drukarskich. Szczególnie ma to istotne znaczenie w przypadku urządzeń optoelektronicznych i elektronicznych, w tym

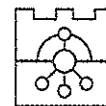


elektroniki strukturalnej, gdzie urządzenie składa się z licznych komponentów zbudowanych z różnego typu materiałów, które precyzyjnie muszą do siebie przylegać. W efekcie konieczne jest korzystanie z złożonych urządzeń drukarskich wyposażonych w wiele, zupełnie różnych modułów odpowiedzialnych za wytwarzanie poszczególnych komponentów. Wiąże się to z kolei z wysokimi kosztami i jest rozwiązaniem, które nie zawsze znajduje zastosowanie w praktyce na szeroką skalę. W celu umożliwienia wytwarzania zaawansowanych układów elektroniki strukturalnej o wysokim stopniu upakowania i złożonych kształtach, konieczne jest zwiększenie stopnia zintegrowania procesu wytwarzania przyrostowego z wytwarzaniem elementów elektronicznych. Jednym ze sposobów takiej integracji, jak słusznie podkreślił w dysertacji Doktorant, jest wykorzystywanie materiałów kompozytowych do wytwarzania elementów elektronicznych.

Biorąc pod uwagę powyższe fakty dotyczące technologii 3D, a także dynamicznie rozwijający się rynek elektroniki, w tym elektroniki strukturalnej, podjętą w pracy doktorskiej tematykę badawczą oceniam za bardzo aktualną i niezwykle istotną.

Głównym celem dysertacji jest opracowanie nowych, przewodzących materiałów kompozytowych do zastosowań w elektronice strukturalnej wytwarzanej z wykorzystaniem technologii druku 3D. Cel pracy została jasno i precyzyjnie określony w rozprawie doktorskiej, który został dookreślony jednym zagadnieniem uzupełniającym, tj. badaniami nad integracją elektroniki strukturalnej z elektroniką tradycyjną poprzez opracowanie sposobu wykonywania połączeń elektrycznych na drukowanych podłożach kompozytowych za pomocą procesu lutowania.

Zaproponowany pomysł badań oceniam jako innowatorski oraz bardzo ambitny. Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Bartłomieja Podsiadły jest pracą interdyscyplinarną z pogranicza elektroniki i inżynierii materiałowej. Przedmiotem recenzowanej rozprawy doktorskiej pt. „*Opracowanie i badania właściwości materiałów kompozytowych do wytwarzania obwodów elektroniki strukturalnej technikami przyrostowymi*” są oryginalne prace eksperymentalne dotyczące otrzymania, charakterystyki i zastosowania nowych materiałów kompozytowych z wybranych polimerów (terpolimeru akrylonitrylo-butadienostyrenowego (ABS), poliamidu (PA), poli(kwasu mlekowego) (PLA), polistyrenu (PS), termoplastycznego poliuretanu) oraz materiałów przewodzących w postaci proszków metali (miedzi, niklu i żelaza) i materiałów węglowych (grafit, sadza, rurki węglowe) do druku elementów elektronicznych urządzeń za pomocą technik przyrostowych FDM (z ang. *Fused*



Deposition Modeling). Tytuł pracy doktorskiej jest zatem adekwatny do zakresu tematycznego prowadzonych badań oraz do opracowanych w ramach niej wyników.

Wydana drukiem praca doktorska liczy 183 strony. Dysertacja składa się ze strony tytułowej, streszczenia w j. polskim i angielskim (2 strony), spisu treści (2 strony), wykazu skrótów (1 strona), wykazu prac naukowych stanowiących podstawę osiągnięcia naukowego rozprawy doktorskiej oraz wykazu prac uzupełniających (4 strony), wstępu literaturowego (rozdział 1, 11 stron), celu rozprawy (rozdział 2, 1 strona), a także opisu obejmującego zestawienie przeprowadzonych własnych badań doświadczalnych, których wyniki ujęto w liczącym 29 stron, rozdziale 4. Tą część pracy kończy krótkie podsumowanie (rozdział 5, liczący 2 strony) oraz wykaz zastosowanej bibliografii (rozdział 6, liczący 12 stron). Rozdział 7 stanowią zebrane publikacje naukowe (6 publikacji) oraz materiały konferencyjne (3 materiały konferencyjne) będące podstawą osiągnięcia naukowego rozprawy doktorskiej. W rozdziale 8 zostały zebrane oświadczenia wszystkich współautorów.

Przechodząc do oceny poszczególnych części rozprawy. Biorąc pod uwagę złożoność tematyki badawczej pracy z pogranicza dwóch dyscyplin naukowych, wstęp literaturowy pracy doktorskiej choć krótki (11 stron), oceniam pozytywnie, gdyż jest to dobrze napisany, treściwy tekst zapoznający czytelnika z technologią druku układów elektronicznych, w tym technologią druku 3D, pokazując najważniejsze zalety, bariery i wyzwania technologii. W rozdziale tym Doktorant we właściwy sposób przeprowadził analizę źródeł literaturowych przedstawiając najważniejsze zagadnienia dotyczące podjętej tematyki badawczej. Kandydat w tej części pracy cytuje 71 pozycji literaturowych, przytaczając publikacje z czasopism o bardzo wysokim współczynniku oddziaływania na środowisko naukowe m.in. *Advanced Materials*, *Advanced Functional Materials*. Niestety, wstęp literaturowy pozostawia mój lekki niedosyt, brak w nim jest szerszego przeglądu najważniejszych doniesień literaturowych w obszarze opracowanych przewodzących kompozytów polimerowych do druku elektroniki funkcjonalnej. Zebranie oraz przedstawienie takich informacji w dodatkowym, osobnym podrozdziale na pewno bardzo wzbogaciłby pracę oraz podkreśliłoby nowość i oryginalność badań prowadzonych przez Doktoranta, które niewątpliwie są bezsprzeczne.

W kolejnym rozdziale (2 i 3) został przedstawiony cel i zakres prowadzonych badań, hipotezy badawcze oraz uzasadnienie wyboru metodyki badawczej w zakresie doboru matryc polimerowych i faz funkcjonalnych (napelniaczy), sposobu przeprowadzenia procesu

mieszania i homogenizacji wybranych materiałów, sposobu prowadzeniu procesu wytłaczania oraz samego procesu druku 3D opracowanych filamentów.

W mojej ocenie Kandydat jasno i precyzyjnie przedstawił najważniejsze problemy badawcze do rozwiązania. Bardzo pozytywnie również oceniam wybór metodologii. **Dobór zastosowanych materiałów i metod badawczych jest dobrze przemyślany, a ich wszechstronny i wzajemnie uzupełniający się charakter pozwolił na zrealizowanie głównego celu rozprawy tj. opracowania i zbadania właściwości innowacyjnych materiałów kompozytowych do zastosowań w elektronice strukturalnej, wytwarzane technologią FDM.**

Najważniejsze wyniki prac badawczych zostały omówione w rozdziale 4, a ich pełny opis został umieszczony w publikacjach P1, P3, P5, P6, P9, P11 oraz w materiałach konferencyjnych [K1, K4, K5]. W pracach tych nie zauważyłam większych błędów merytorycznych. wszystkie publikacje były poddane wcześniejszemu procesowi oceny przez recenzentów.

W celu opracowania nowych kompozytów polimerowych Doktorant zastosował metodę rozpuszczalnikową z wykorzystaniem mieszalników mechanicznych lub sonifikacji do homogenizacji faz. Opracowane materiały zostały następnie wytłoczone w postaci filamentu za pomocą wytłaczarki jednoślismakowej z dwiema strefami grzewczymi. W kolejnym etapie kompozyty zostały wykorzystane do druku elementów elektronicznych za pomocą technologii FDM [publikacje P1, P6, K1, K4, K5]. Ponadto, elektryczne i mechaniczne właściwości nowych i oryginalnych kompozytów materiałowych zostały określone za pomocą m.in. pomiaru rezystywności prądem stałym, charakterystyki prądowo-napięciowej, pomiarów temperaturowych, pomiarów lepkości, za pomocą standardowej próby rozciągania przy użyciu maszyny Comotech QC-506M2. Dzięki wykorzystaniu tego typu technik Doktorant miał możliwość powiązania w/w właściwości, w tym progu perkolacji [P1, K5], charakteru przewodnictwa [P1, P6, P9], właściwości mechanicznych [K4, P6] ze sposobem otrzymania danego kompozytu oraz ilością użytego napełniacza w matrycy polimerowej. Ostatnim etapem pracy było opracowanie parametrów druku materiałów kompozytowych za pomocą FDM oraz zastosowanie materiałów do konstruowania elementów urządzeń elektroniki strukturalnej. Niezwykle interesującym elementem pracy było pokazanie praktycznego zastosowania opracowanych materiałów kompozytowych do druku ścieżek przewodzących na materiałach

tekstylnych [P9] oraz próby łączenia poszczególnych elementów za pomocą procesu lutowania [P5].

Do najważniejszych osiągnięć Doktoranta można zaliczyć wyniki opisane w publikacji P1 i P5. W pierwszej publikacji pt. „*Heterophase materials for fused filament fabrication of structural electronics*” zostały przedstawione badania dotyczące kompozytów składają się z elektrycznie przewodzącego proszku miedzi i trzech różnych matrycy polimerowych ABS, PLA, PS. Zbadano wpływ różnych polimerów na właściwości elektryczne kompozytów. Doktorant wykazał, że najniższą rezystywność ($0,156 \times 10^{-5} \Omega\text{m}$) osiągnięto dla kompozytu ABS/Cu przy stężeniu Cu 84,6% masowo. Uzyskane wartości rezystywności są znacznie niższe niż odnotowane w literaturze dla innych znanych przewodzących kompozytów i nanokompozytów. Jest to jedno z ważniejszych osiągnięć Doktoranta. W pracy zaprezentowano również przykłady zastosowania przewodzących struktur drukowanych 3D wykonanych z opracowanych kompozytów m.in. do otrzymania diod LEDs i klawiatury.

Z kolei, w pracy P5 pt. „*Soldering of Electronics Components on 3D-Printed Conductive Substrates*” materiały kompozytowe z ABS, PS i PLA o wysokiej zawartości Cu (powyżej 80% masowo), zostały wydrukowane za pomocą technologii 3D, a następnie poćdane procesowi lutowania. W badaniach zastosowano dwie różne metody lutowania (ręczne i rozpyłowe) i dwa rodzaje stopów lutowniczych (niskotemperaturowy i wysokotemperaturowy). Doktorant wykazał, że istnieje możliwość wytwarzania wytrzymałych, przewodzących połączeń lutowanych na przewodzących kompozytowych wydrukowanych za pomocą technologii FDM. Ponadto, udowodnił, że mechaniczne czyszczenie i użycie dodatkowego topnika na podłożach kompozytowych są niezbędne do uzyskania wysokiej jakości połączeń lutowanych.

Praca doktorska jest oryginalnym i szerokim studium nad technologią wytwarzania i druku nowych materiałów kompozytowych wykazujących właściwości przewodzące, na potrzeby elektroniki strukturalnej. Autor pracy podjął ambitne zadanie zbadania różnorodnych aspektów opracowania nowych materiałów kompozytowych i ich druku, zarówno pod względem technologicznym, jak i praktycznym. Doktorant musiał pokonać liczne problemy technologiczne związane z łączeniem dwóch różnych faz, m.in. z aglomeracją i sedymentacją napelnacza w matrycy polimerowej. To wymagała od Doktoranta dużego nakładu pracy i dogłębnej znajomości tematyki badawczej, w celu optymalizacji poszczególnych etapów technologicznych. Doktorant wykazał umiejętność poprawnego i przekonywującego

przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników. W mojej opinii, uzyskane przez Pana Bartłomieja Podsiadły wyniki mają charakter aplikacyjny, a możliwe ich praktyczne zastosowanie może w przyszłości zaowocować istotnym rozwojem technologii elektroniki strukturalnej i technologii druku trójwymiarowego.

IV. Uwagi merytoryczne i dyskusyjne

Przedstawioną do recenzji rozprawę doktorską oceniam bardzo pozytywnie, niemniej Doktoranta nie ustrzegł się pewnych uchybień. Ponadto, podczas lektury pracy nasunęła mi się kilka pytań o charakterze dyskusyjnym, które pozwolę sobie zadać Doktorantowi.

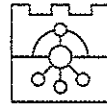
1. W pierwszej, literaturowej części pracy w mojej opinii zabrakło dogłębnego przeglądu najważniejszych doniesień literaturowych w obszarze kompozytowych materiałów przewodzących do zastosowań w elektronice i druku 3D.

2. Jednym z większych wyzwań pracy doświadczalnej w moim odczuciu, było połączenie dwóch różnych faz tj. fazy polimerowej z fazą nieorganiczną w celu otrzymania homogenicznego kompozytu, bez aglomeracji i sedymentacji. W pracy wykorzystano zakupione komercyjnie proszki metali i materiały węglowe. Nie w każdej publikacji znalazłam dokładną charakterystykę wykorzystanego filamentu. Brak było również informacji na temat prób wcześniejszej modyfikacji/funkcjonalizacji powierzchni wykorzystanego filamentu. Tego typu praktyki stosuje się powszechnie w przypadku hybrydowych nanokompozytów. Czy rozważano próby funkcjonalizacji napelnacza w celu pozbycia się aglomeracji w kompozycie, a jeśli nie, to dlaczego?

3. Nie znalazłam w pracy, w tym w części badawczej, również informacji na temat wpływu kształtu napelnacza przewodzącego na osiągnięcie progu perkolacji przewodnictwa. Z punktu widzenia kompozytowych materiałów przewodzących jest bardzo istotny czynnik. Bardzo proszę tu o komentarz.

3. Jak jest powtarzalność opracowanej technologii otrzymywania przewodzących materiałów kompozytowych oraz stabilność wytworzonych elementów ?

4. Z racji roli recenzenta, muszę zwrócić uwagę na kilka bardzo drobnych niedociągnięć dotyczących strony edytorskiej pracy. Całość tekstu została napisana jasnym i poprawnym językiem, nie znalazłam większych błędów językowych czy stylistycznych. Jedyna moja uwaga dotyczy sposobu przedstawiania przypisów literaturowych, jest w nim pewien brak konsekwencji m.in. raz tytuły czasopism przytoczone są pełne, innym razem tylko ich skróty.



To samo dotyczy sposobu wymieniania nazwisk współautorów, raz zostali wymienieni wszyscy, innym razem tylko pierwszy.

5. Kolejna uwaga dotyczy sposobu stosowania skrótów w pracy. Czasami w tekście brakuje wyjaśnienia danego skrótu, w momencie gdy jest stosowany po raz pierwszy.

Na koniec pragnę podkreślić, że wspomniane uwagi i nieścisłości nie wpływają znacząco na wartość naukową rozprawy doktorskiej, która oceniam pozytywnie.

V. Podsumowanie i wnioski końcowe

Podsumowując stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji praca doktorska Pana mgr inż. Bartłomieja Podsiadły pt. *„Opracowanie i badania właściwości materiałów kompozytowych do wytwarzania obwodów elektroniki strukturalnej technikami przyrostowymi”* stanowi oryginalne rozwiązanie istotnego problemu naukowego, spełniając tym samym wszystkie kryteria zwyczajowe i formalne z wyraźnym nadmiarem, stawiane rozprawom doktorskim określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 poz. 1668). Wnoszę zatem do Rady Naukowej Dyscypliny Automatyki, Elektroniki, Elektrotechniki i Technologii Kosmicznej Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie Pana mgr inż. Bartłomieja Podsiadły do dalszych etapów przewodu doktorskiego.