

Prof. dr hab. Agnieszka Iwan
Wojskowy Instytut Techniki Inżynieryjnej im. prof. Józefa Kosackiego
ul. Obornicka 136,
50-961 Wrocław

Wrocław, 21.08.2023

WPLYNĘŁO
2023 -09- 0 4
dn.....

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Bartłomieja Wałpuskiego
pt.: „Opracowanie metody wytwarzania wysokoprzewodzących ścieżek na potrzeby
elektroniki strukturalnej”**

wykonanej na Politechnice Warszawskiej (promotor: dr hab. Marcin Słoma, prof. Uczelni)

Ambitne i wizjonerskie zadanie nałożył na siebie Doktorant podejmując się opracowania metody kompleksowego wytwarzania wysokoprzewodzących połączeń dla aplikacji w elektronice strukturalnej. W szczególności Doktorant skupił się na otrzymaniu metalicznych połączeń, które nazywa ścieżkami, na addytywnie wytworzonych termoplastycznych podłożach, tym samym definiując i zapełniając lukę badawczą przestrzennego wytwarzania elektroniki strukturalnej.

Pytanie, które nasuwa się podczas czytania rozprawy doktorskiej brzmi: Czy można w XXI wieku osiągnąć postęp technologiczny w zakresie elektroniki strukturalnej?, która jest bardzo szeroko rozwijana na świecie i uważana za siostrę elektroniki drukowanej. Przypomnijmy w tym miejscu legendarnego przedsiębiorcę i inwestora, Petera Thiela, który w książce „Zero to one” opisuje, w jaki sposób możemy tworzyć i odkrywać nowe rzeczy. Powielanie znanych informacji prowadzi od 1 do n, dodając kolejne elementy czegoś już znanego i odkrytego. Jeśli jednak tworzymy, czy projektujemy coś całkowicie nowego, to przechodzimy od 0 do 1. Czyli, wszystko rozpoczyna się od umiejętności samodzielnego i kreatywnego myślenia i właściwego zadawania pytań, które pozwalają odkryć wartość dodaną w nieoczekiwanych miejscach. Umiejętność wyciągania właściwych wniosków także z przeprowadzonych badań, które nie zakończyły się sukcesem, to także jedna z pozytywnych cech, która wyróżnia Doktoranta jako entuzjastę prowadzonych szeroko prac eksperymentalnych i technologicznych w celu analizy wad i zalet proponowanych rozwiązań i wybrania właściwej ścieżki dalszych prac badawczych. Produkt ulepszony poprzez implementację różnych rozwiązań technologicznych to efekt finalny pracy Doktoranta. Jak przedstawiono w dysertacji wizja wydrukowania urządzeń elektronicznych w całości to wciąż tzw. melodia przyszłości, ale opracowane w dysertacji rozwiązania mogą być pomocne w procesach przemysłowego wytwarzania urządzeń w myśl idei tzw. złotego trójkąta w elektronice, czyli tanio, wydajnie i z długoterminową żywotnością, jednocześnie mając na uwadze aspekty ekologiczne. Zaproponowane rozwiązania są w dobrej korelacji z programem MICE (mezoskopowo zintegrowana elektronika konformalna, amerykańska agencja zaawansowanych projektów badawczych w obszarze obronności, DARPA), którego istotnym aspektem już w XIX wieku było opracowanie technologii, która w jednym procesie, w ciągu kilku godzin umożliwi wytworzenie kompletnego układu na podstawie opracowanego odpowiednio projektu.

W tym miejscu należy przytoczyć na czym polega innowacja (łac. innovatio – odnowienie). To wszelkie zmiany, które pociągają za sobą korzyść ekonomiczną i uwzględniają aspekty

srodowiskowe. To ciąg działań prowadzących do wytworzenia całkowicie nowych lub w dużym stopniu ulepszonych produktów, procesów czy systemów. To rozwiązanie, które nigdy wcześniej nie znalazło zastosowania przynajmniej w skali przedsiębiorstwa. Tematyka doktoratu zmierza w kierunku innowacji produktowych i procesowych (technologicznych) i obejmuje także ulepszenia proekologiczne. Bez wątpienia tematyka doktoratu mieści się w najnowszych nurtach badań technologicznych i materiałowych dla praktycznych zastosowań w elektronice strukturalnej.

Rozprawa doktorska została napisana w języku polskim i obejmuje sumarycznie 94 strony, zilustrowana jest 30 rysunkami i 6 tabelami. Spis literatury zawiera 195 pozycji literaturowych z przedziału czasowego 1964-2022, w tym 4 artykuły Doktoranta.

Praca doktorska składa się z 10 rozdziałów, oraz streszczenia w wersji polsko- i anglojęzycznej i wykazu stosowanych skrótów. Doktoranta cechuje duża zwięzłość przy opisywaniu wyników badań, co przekłada się na bardzo syntetyczne i wielokrotnie schematyczne przedstawienie wyników bez próby głębszej ich interpretacji. Aczkolwiek, należy podkreślić, iż bez wątpienia Doktorant jest pasjonatem elektroniki strukturalnej z punktu widzenia technologii. Rozdział 1 (4 strony) dotyczy wprowadzenia do tematyki rozprawy i w głównej mierze skupia się na przedstawieniu istniejących obecnie aplikacji elektroniki strukturalnej zarówno dla zastosowań cywilnych jak i wojskowych, co dodatkowo podkreśla ważność prowadzenia prac w tym kierunku. Należy wspomnieć, iż wśród priorytetowych kierunków badań naukowych w resorcie obrony narodowej w latach 2021-2035 znajdują się Technologie materiałowe i wytwarzania, w tym technologie addytywne (przyrostowe, druk 3D) oraz materiały inteligentne i zaawansowane (kompozyty, polimery, nanomateriały).

Rozdział drugi zatytułowany Stan wiedzy (27 stron – najobszerniejszy rozdział w pracy), składa się z 4 podrozdziałów, a podrozdział z 4 lub 5 podrozdziałów, w których Doktorant szczegółowo opisuje zarówno techniki druku bezpośredniego (strumieniowy, aerozolowy, bezpośrednie wytłaczanie - DIW oraz wytłaczanie uplastycznionego filamentu), przewodzące materiały poligraficzne, metody utwardzania oraz przedstawia podobne do opisanych w pracy istniejące rozwiązania techniczne. Niewątpliwie rozdział drugi wzbogaciłyby informacje odnośnie obowiązujących wymogów wojskowych dotyczących nanoszenia warstw na powierzchnie niepłaskie i elastyczne oraz niezawodności urządzeń, które zdecydowanie są inne niż dla zastosowań cywilnych. W rozdziale 2.1.3. Doktorant omawia stosowaną w pracy technikę bezpośredniego wytłaczania DIW argumentując jej główne zalety takie jak prostota nanoszenia materiałów i szeroki zakres adaptacji pozwalającą nanosić materiały o dużym zakresie lepkości, czyli od 10^2 do 10^6 mPa/s, co znacznie poszerza gamę materiałów możliwych do nanoszenia tą techniką. Doktorant ma także świadomość o praktycznym stosowaniu techniki DIW w przemyśle, ale do nanoszenia głównie klei czy uszczelniaczy, a nie past, które są w centrum zainteresowań naukowych Doktoranta. Doktorant przedstawia w zależności od sposobu wytłaczania materiału podział metody DIW na trzy rodzaje (wytłaczanie: z mechanicznie lub pneumatycznie poruszonym tłokiem, oraz ślimakowe), ale nie analizuje każdej z metod. Proszę o przedstawienie różnic we właściwościach otrzymywanych materiałów w zależności od rodzaju metody DIW. Na podkreślenie zasługuje zbiorcze przedstawienie omawianych metod wydruku bezpośredniego w tabeli, co ułatwia analizę. Rozdział 2.2. dotyczy materiałów poligraficznych o właściwościach przewodzących, aczkolwiek Doktorant zatytułował podrozdział Materiały poligraficzne o właściwościach **elektronicznych**. Proszę o wyjaśnienie tego pojęcia. Moim zdaniem powinno być elektrycznych albo przewodzących. Doktorant omawia na dużym stopniu ogólności materiały

na bazie wybranych metali (Ag, Au, Al, Cu) z przedstawieniem ich technologicznych problemów dla zastosowań w elektronice strukturalnej. W podrozdziale 2.2.2. wymienione są węglowe materiały przewodzące takie jak grafen czy nanorurki węglowe, zaś w rozdziale 2.2.3. polimery przewodzące. Niestety oba podrozdziały zostały bardzo ubogo napisane, biorąc pod uwagę atrakcyjność zarówno tematyki polimerów przewodzących jak i materiałów węglowych dla opto-elektroniki. Proszę o przedstawienie właściwości użytkowych obu grup materiałów. Prace bezwzględnie wzbogaciły by informacje o domieszkowaniu polimerów, które jak wiadomo od przyznania nagrody Nobla z dziedziny chemii w 2000 roku dla Heegera, MacDiarmida i Shirakawy za odkrycie i wkład w rozwój badań polimerów przewodzących zyskały duże zainteresowanie i znalazły zastosowanie praktyczne. Wykazali oni, że poliacetylen poddany działaniu par bromu lub jodu powoduje wzrost przewodnictwa elektrycznego do wartości charakterystycznych dla przewodnictwa metali. Podobnie wzrost przewodnictwa obserwowano dla domieszkowanej PANI. Proszę zatem o wyjaśnienie sformułowania, cytuję *„Ich stabilność mogą poprawić różne dodatki chemiczne, jednak zazwyczaj negatywnie wpływają one na właściwości elektryczne.”* Podobnie sformułowanie *„... niewielką masą.”* w odniesieniu do polimerów nie jest precyzyjne i poprawne. Proszę o podanie konkretnych wartości masy molowej polimerów. Sformułowanie iż *„właściwości potrafią degradować”* jest niepoprawne to polimer degraduje, a nie właściwości. Właściwości mogą ulec pogorszeniu. Rozdział 2.2.4. Doktorant poświęcił omówieniu związków metaloorganicznych, które można dodawać do tuszy, omawiając kluczowe aspekty technologiczne związane z ich wytwarzaniem i utwardzaniem przechodząc tym samym płynnie do omówienia metod utwardzania takich jak termiczne, mikrofalowe, plazmowe, impulsami światła, czy laserowe w rozdziale 2.3. Niewątpliwie podrozdział 2.3. wzbogaciły by informacje o konkretnych wartościach otrzymywanych parametrów, aczkolwiek Doktorant przygotował podrozdział na dużym stopniu ogólności, używając stwierdzeń typu, cytuję: *„...niskie parametry elektryczne, krótki termin przydatności do użycia, przeciętne wyniki, dużą chropowatością, o niskiej temperaturze zeszklenia”*. Proszę o doprecyzowanie tych informacji. Rozdział 2.4. Doktorant poświęcił omówieniu jak sam nazwał podobnych rozwiązań technicznych dla wykorzystywanej w pracy techniki DIW dla elektroniki strukturalnej. Argumentując wybór techniki Doktorant wymienia jej zalety takie jak kompromis pomiędzy otrzymywanymi właściwościami elektrycznymi ścieżek przewodzących, a prostotą zastosowanej techniki. Ponadto w pracy metodę DIW zastosowano także do wykonywania połączeń dla szerokiej gamy możliwych do zastosowania materiałów. Metodę DIW stosowano w przemyśle do wytwarzania na bazie klejów przewodzących w pełni przestrzennych układów elektronicznych, baterii litowo-jonowych (elektrod, kolektora na bazie ceramiki, metali czy tlenku grafenu) czy QLED, aczkolwiek w celu miniaturyzacji urządzeń i rozwoju elektroniki strukturalnej wciąż jest wiele ograniczeń głównie pochodzących od zastosowanych materiałów i ich parametrów elektrycznych (przewodność, obciążalność prądowa, żywotność, cena). Dlatego też, Doktorant podjął się zadania eliminacji ograniczeń materiałowych dla elektroniki strukturalnej. Jako perspektywiczne materiały zaproponował pasty kompozytowe dostępne handlowo i pastę z nanoAg wytworzoną na PW, zaś jako technikę utwardzania metodę laserową tak aby zminimalizować negatywny wpływ na stosowane podłoże polimerowe (PET, PLA, ABS) oraz umożliwić otrzymanie korzystnych parametrów elektrycznych. Rozdział 3 (2 strony) przedstawia cel i zakres pracy, które są naturalną konsekwencją analizy naukowej tematu dysertacji i zostały sformułowane jako opracowanie metody wytwarzania ścieżek przewodzących na polimerowych podłożach wykonanych addytywnie. Otrzymane ścieżki powinny charakteryzować się konduktywnością elektryczną wyższą niż kleje przewodzące, ponad $2 \cdot 10^6$ S/m, a zaproponowana metoda nanoszenia i utwardzania materiału przewodzącego powinna również nadawać się do

wykonywania połączeń z obecnymi na rynku komponentami elektrycznymi. Zaplanowany proces badawczy skupiał się na opracowaniu nowych rozwiązań technologicznych dotychczas nie znanych z literatury i obejmował zbadanie techniki DIW pod kątem wpływu parametrów reologicznych zastosowanego materiału oraz procesowych pod kątem wytworzonej geometrii ścieżki przewodzącej. Dodatkowo opracowano dla badanych materiałów technologię utwardzania laserowego i przeanalizowano możliwość wykonania połączeń elektrycznych przy zastosowaniu zoptymalizowanych wymogów technicznych i materiałowych. Doktorant deklaruje, iż zaproponowane i opracowane rozwiązania technologiczne i materiałowe umożliwią w pełni trójwymiarowe wytwarzanie elektroniki strukturalnej o właściwościach elektrycznych i żywotności porównywalnej z obecnie istniejącymi układami tak, aby umożliwić oferowanie elektroniki spersonalizowanej czyli „szytej na miarę”.

Czwarty (5 stron) i piąty (10 stron) rozdział przedstawiają metodologię badań zastosowaną w celu realizacji pracy doktorskiej i obejmują zarówno optymalizację procesu technologicznego DIW do nakładania past jak i addytywne wytwarzanie ścieżek przewodzących na bazie analizowanych past. Dodatkowo opracowano model analityczny opisujący zjawisko nanoszenia bezpośredniego co jest wartością dodaną pracy. Proszę o podanie błędu dla parametrów reologicznych badanych materiałów oraz doprecyzowanie stwierdzenia „...*pomiary są dość zgodne z wartościami wynikającymi z modelu*”. Przy analizie wyników badań należy unikać sformułowań ogólnych i być bardzo precyzyjnym w podawaniu otrzymywanych wartości.

Podrozdział 5.1. Doktorant zatytułował nieprecyzyjnie, nie podając jakimi pastami się zajął. Wytypowane dwie pasty Henkel QMI 2419MS i Loctite EDAG 479SS E&C naniesione na podłoże PET nie spełniły oczekiwanych wymagań i proces ich utwardzania zakończył się niepowodzeniem. Pomimo to wyniki badań zostały opublikowane przez Doktoranta w pracy *Appl. Sci*, 2022, aczkolwiek w dysertacji nie przedstawiono badań nad zastosowaniem pasty w elektronice strukturalnej. Proszę o przedstawienie otrzymanych wyników. Ponadto, po raz kolejny Doktorant używa sformułowania, cytuję „... *przewodności ...są znacząco niższe, ... duża chropowatość podłoża.*” proszę o podanie konkretnych wartości oraz przedstawienie wyników badań AFM z podaniem parametrów chropowatości R_s , R_{sh} .

W kolejnym etapie prac badawczych próbowano zastosować materiał z domieszką nanosrebra otrzymany na PW. Proszę o doprecyzowanie informacji odnośnie zastosowanych organicznych stabilizatorów i nośnika. Dopiero w rozdziale 9.1. znajduje się informacja, iż jako nośnik stosowano, podobnie jak dla miedzi, PMMA rozpuszczony w 2-(2-butoksyetoksy)etylu. Analizowano wpływ rodzaju podłoża na otrzymane wyniki wybierając 4 polimery o różnych właściwościach termicznych (PLA, ABS, polieteroimid ULTEM 9085, poliamid HPPA). Prace wzbogaciły by informacje o wartościach temperatury zeszklenia i rozkładu dla badanych podłoży polimerowych podane już w rozdziale 5.2., a nie dopiero w rozdziale 8, gdzie w tabeli umieszczono właściwości termiczne dla wybranych polimerów, takich jak PLA, PA12 i ULTEM. Otrzymane wyniki porównano z danymi literaturowymi konkludując, iż zaproponowane rozwiązania technologiczne (DIW, utwardzanie laserowe) i materiałowe (PLA, pasta z nanoAg) pozwalają na addytywne wytworzenie ścieżek przewodzących o przewodności $3,2 \cdot 10^6$ S/m, które Doktorant z powodzeniem zastosował do wykonania pojemnościowej klawiatury dotykowej sterowanej za pomocą kontrolera Arduino, co świadczy o implementacji zaproponowanych rozwiązań w praktyce.

Proszę o przedstawienie analizy dlaczego dla past komercyjnych nie otrzymano zadawalających wyników w porównaniu z pastą otrzymaną laboratoryjnie. Czy wykonano badania dla pasty komercyjnej na jednym z podłoży zastosowanych dla pasty laboratoryjnej?

Implementując opracowane technologie, utwardzanie laserowe zastosowano także do opracowania metody szybkiego prototypowania układów elektroniki drukowanej dla masowej produkcji w kierunku skrócenia czasu i zmniejszenia kosztów procesu technologicznego. Dlatego też opracowano metodę opartą o sitodruk przy zastosowaniu jako materiałów PET i poliimid Kapton (podłoże) i pasty z nanoproszkiem srebra, otrzymując możliwość drukowania wzorów o różnych kształtach bez konieczności wykonywania nowego sita. Wyniki badań opublikowano w *Physics Experiments*, 2018. Proszę o informację, czy podłoża polimerowe były specjalnie oczyszczane przed nanoszeniem materiału przewodzącego, co jest kluczowe przy konstrukcji urządzeń opto-elektrycznych.

W kolejnym 6 rozdziale dysertacji (4 strony) Doktorant konsekwentnie realizuje cele badawcze i poszerza część badawczą o połączenia przewodzące wykonane w oparciu o te same materiały przewodzące co ścieżki na trzech rodzajach podłoża polimerowych (PLA, HPPA, ULTEM) dla elektroniki strukturalnej. Unifikacja proponowanych rozwiązań może przyczynić się zarówno do ograniczenia ilości zużywanych materiałów jak i do poprawy funkcjonowania urządzeń poprzez analizę niezawodności wytworzonych połączeń elektrycznych. Wyniki badań nad połączeniami na bazie pasty z nanoproszkiem srebra Doktorant opublikował w *Period. Polytech. Electr. Eng. Comput. Sci.* 2019. Konkluzja Doktoranta o większym wpływie materiału przewodzącego niż polimeru zastosowanego jako podłoże jest oczywista. Badane polimery mają niewielką wartość przewodnictwa. Proszę o doprecyzowanie tego stwierdzenia i przedstawienie wyników na podłożach przewodzących takich jak np. P3HT, czy PEDOT:PSS z pastą srebrną.

Doktorant stwierdza także, iż nie istnieje jednoznacznie najlepsze podłoże o najlepszych właściwościach mechanicznych. Proszę o doprecyzowanie jakie wartości są pożądane dla elektroniki strukturalnej i czy inne, niż pomiar siły ścinającej, badania mechaniczne wykonano dla badanych podłoży.

Rozdział 7 (7 stron) Doktorant poświęcił bardzo ważnemu zagadnieniu związanemu z żywotnością urządzeń analizując niezawodność wytworzonych układów dla elektroniki strukturalnej. W myśl zasady, iż zero defektów ma wpływ na bezpieczeństwo, koszt i zmniejszenie ilości odpadów elektronicznych i współgrające z zasadami Zielonej Chemii. Osamotnione sformułowanie „niezawodność” używane przez Doktoranta w dysertacji jest nie do końca precyzyjne i może być błędnie interpretowane. Pojęcie niezawodności, czyli żywotności jest uzależnione od warunków użytkowania (pomiarowych) i czasu. Prawdopodobieństwo wystąpienia uszkodzenia danego urządzenia w określonej jednostce czasu pracy to intensywność uszkodzenia. Dla wielu podzespołów elektronicznych, a zwłaszcza przyrządów półprzewodnikowych, prawdopodobieństwo to w wielu zastosowaniach tylko nieznacznie odbiega od jedności w długim okresie czasu (kilkanaście - kilkadziesiąt lat) i jest zależne od aplikacji urządzenia. Dla przykładu: kilkadziesiąt lat - w technice kosmicznej (np. bezałogowe sondy kosmiczne Voyager I i II, wysłane przez NASA w 1977 roku. Po 46 latach duża część urządzeń elektronicznych nadal pracuje, a pokładowy reaktor termoelektryczny powinien zapewnić zasilanie i działanie aż do 2025 roku.) czy w energetyce i w zastosowaniach militarnych. Mniejsze wartości przewiduje się w przypadku urządzeń medycznych, systemów automatyki i sterowania oraz w telekomunikacji. Średnio 10-15 lat dla motoryzacji, oraz kilka-kilkanaście lat lub krócej dla wyrobów powszechnego użytku.

Badania przeprowadzone przez Doktoranta dotyczące niezawodności mają charakter bardzo wstępny i nie nazwałabym je pilotażowymi. Obejmują tylko testy w podwyższonej temperaturze dla ścieżek przewodzących wykonanych na bazie pasty komercyjnej na podłożu PET. Doktorant ma świadomość wpływu procesu wytwarzania próbek, aczkolwiek powtarzalność operacji w procesie produkcyjnym zdaniem Doktoranta powinna być na

wysokim poziomie co wyeliminuje obserwowane w badaniach laboratoryjnych rozbieżności. Obliczony średni czas żywotności próbki zależny był zarówno od liczby próbek w grupie, czasu badania i maksymalnie wyniósł 8000 h. Zdaniem Doktoranta jest to akceptowalny wynik biorąc pod uwagę czas życia komponentów dla przemysłu motoryzacyjnego równy 10 000 h. Doktorant wyniki badań dotyczące niezawodności urządzeń dla elektroniki strukturalnej opublikował w *Appl. Sci.* 2022. Pracę wzbogaciłyby informacje/wytyczne odnośnie szeregu ogólnych zaleceń mających na celu uzyskanie wysokiego poziomu niezawodności projektowanych urządzeń i systemów.

Kolejnym zagadnieniem, istotnym z naukowego punktu widzenia, była próba interpretacji mechanizmu uszkodzeń zachodzących podczas degradacji i finalnie prowadząca do wzrostu rezystancji badanych układów. Doktorant wymienia dwa możliwe warianty: fizyczny związany ze zmianą kształtu ścieżek przewodzących spowodowaną np. elektromigracją atomów Ag i drugi chemiczny związany ze zmianami w materiale przewodzącym zachodzącymi pod wpływem termicznej degradacji podłoża polimerowego z utwardzoną pastą srebrną. Badano wymiary ścieżek i połączeń przewodzących po teście trwałości stosując nieinwazyjną technikę tomografii RTG oraz spektroskopie rentgenowską z dyspersją energii EDS w celu określenia składu chemicznego powierzchni. Doktorant, na podstawie przeprowadzonych badań konkluduje, iż najprawdopodobniej przyczyną uszkodzeń badanych układów, oraz związany z tym wzrost ich rezystancji, było utworzenie się warstwy międzymetalicznej. Dla szerokiej gamy zastosowań praktycznych należałoby stosować warstwy pośrednie lub używać takich materiałów, które z cyną nie wytwarzają warstw międzymetalicznych, czyli np. miedź. Prace wzbogaciłyby badania technikami mikroskopowymi SEM, TEM, AFM oraz tanią i bezinwazyjną techniką termowizji, szeroko aplikowanej do identyfikacji defektów/uszkodzeń nie tylko urządzeń ale też komponentów składowych, tak aby zaoszczędzić czas i zminimalizować koszty.

Rozdział 8. Doktorant poświęcił analizie wpływu rodzaju i właściwości termicznych podłoża polimerowego na utwardzanie laserowe w celu znalezienia synergii pomiędzy zastosowaną metodą utwardzania wysokotemperaturowych materiałów na podłożach polimerowych takich jak PLA, PA12 i ULTEM o temperaturach zeszklenia od 42 do 177 °C, osiągając swoisty kompromis oraz przedstawiając wymogi dotyczące podłoży oraz próbę analizy obserwowanych zjawisk, poprzez zastosowanie równania Arrheniusa, które jest znane z literatury dla opisu termicznej degradacji polimerów. Pomimo, rozbieżności otrzymanych danych Doktorant konkluduje, iż energia aktywacji utwardzania pasty jest prawie dwukrotnie niższa niż energia aktywacji dekompozycji polimeru, oraz iż parametry termiczne badanych polimerów nie miały znacznego wpływu na proces utwardzania laserowego, co jest nieco zaskakującym stwierdzeniem i nie jest spójne z otrzymanymi wartościami konduktywności dla różnych podłoży. Doktorant wspomina także o wpływie porowatości podłoża polimerowego, prawdopodobnie mając na myśli chropowatość podłoża. Proszę o wyjaśnienie. Porowatość (bezwzględna i względna) materiału to właściwość ciał stałych określająca wielkość i ilość pustych przestrzeni wewnątrz materiału. Chropowatość to cecha powierzchni ciała stałego, oznacza rozpoznawalne optycznie lub wyczuwalne mechanicznie nierówności powierzchni, wynikające z charakteru obróbki i użytego narzędzia oraz rodzaju materiału. Bezwzględnie rozdział 8.1. wzbogaciłyby dane eksperymentalne dla podanych podłoży polimerowych wykonane technikami TGA i DSC w tych samych warunkach eksperymentalnych (atmosfera, szybkość ogrzewania), a nie odniesienie do danych literaturowych. Jaki jest 5% ubytek masy oraz masa molowa oraz chropowatość podłoża dla PLA, PA12 i ULTEM? Wyniki badań opublikowano w *Adv. Eng. Mater.* 2021.

Rozdział 9 (6 stron) jest rozdziałem kończącym opis wyników badań eksperymentalnych i jest na wstępie nieco intrygujący, gdyż niejako próbuje w moim odczuciu obalić/zaprzeczyć dotychczas otrzymane wyniki badań dla past srebrnych i pozytywnie argumentuje na rzecz zastosowania miedzi jako warstw metalicznych, której jak wiemy głównym problemem jest utlenianie, czyli także nie wpływamy na poprawę żywotności urządzeń, o czym Doktorant wspomina na zakończenie rozdziału 9.2, mając świadomość o wyzwaniach stojących przed zastosowaniem Cu dla elektroniki strukturalnej, w takim ujęciu jak zaproponował i zrealizował w dysertacji. Tym bardziej, iż Doktorant konkluduje finalnie w 9.1., iż Cu jest nieodpowiednia dla zastosowań w elektronice strukturalnej. Moim zdaniem ten rozdział powinien być wkomponowany jako alternatywa do past srebrnych w rozdziale 6. Opisane w rozdziale 9 wyniki badań mają raczej charakter badań przedwstępnych. Bezwzględnie rozdział wzbogaciłaby dogłębna analiza mikroskopowa badanych materiałów. Z drugiej strony, rozdział 9.2. opisuje zakończone sukcesem i zgłoszone do ochrony patentowej (P.438920, 2021) wyniki badań w oparciu o mrówczan miedzi (II), także z dodatkiem etylenodiaminy (EDA), jako związek metaloorganiczny. Utwardzanie laserowe dla czystego mrówczanu miedzi zakończyło się pełnym sukcesem, przeciwnie do mrówczanu z EDA. Jest to bardzo ciekawa i wartościowa część pracy doktorskiej, wkraczająca w obszar badań interdyscyplinarnych łączących zagadnienia z elektroniki, elektrotechniki i chemii. Pracę, wzbogaciłyby wzory strukturalne i próba schematycznego przedstawienia oddziaływań niekowalencyjnych między $\text{Cu}(\text{COOH})_2$ i $\text{NH}_2(\text{CH}_2)_2\text{NH}_2$.

Dorobek naukowy Pana mgr inż. Bartłomieja Wałpuskiego związany ściśle z rozprawą obejmuje 4 publikacje umieszczone na liście *Journal Citation Reports* z IF = 1,9-4,12. Doktorant jest autorem do korespondencji każdej pracy. Publikacje ukazały się w czasopismach takich jak *Applied Sciences* (2022), *Advanced Engineering Materials* (2022), *Periodica polytechnica Electrical engineering and computer science* (2019), *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering* (2018). Ponadto Doktorant jest współautorem zgłoszenia patentowego pt. Materiał z metaliczną fazą wiążącą do zastosowań w technikach addytywnych, 2021, P438920. Na podkreślenie zasługuje dodatkowa aktywność naukowa Doktoranta i opublikowanie 5 artykułów niewchodzących w skład rozprawy oraz prezentacja wyników badań na 4 konferencjach międzynarodowych. Według bazy Scopus Doktorant posiada Indeks Hirsh'a 3. Ponadto na wyróżnienie zasługuje fakt, iż Doktorant był beneficjentem programu FIRST TEAM. W mojej opinii jest to dobry dorobek naukowy jak na Doktoranta broniącego rozprawę doktorską.

W pracy Doktorant popełnił wiele niezgrabności językowych (czy kolokwializmów) wynikających prawdopodobnie z bezpośredniego tłumaczenia określeń i sformułowań z języka angielskiego oraz wiele tzw. literówek. Np. **zagrzebanymi** podzespołami, **popularnych** polimerów, obwodów w **trójwymiarze**, właściwościach **elektronicznych**, związki **odpadowe**, metoda utwardzania **pulsami** światła, przy tym ciśnieniu widać także **odchyły**, przewodność... charakteryzuje się wyraźnie niższym **rozstępem**, **pustki** takie byłyby widoczne w badaniu RTG, branża **automotive**, **rozstęp** wyników, miedź dużo łatwiej ulega **oksydacji**, zjawisko **ballingu**.

Podsumowując, pomimo wyrażonych powyżej zastrzeżeń należy stwierdzić, iż Pan mgr inż. Bartłomiej Wałpuski przedstawił zwięzłą w formie pracę, popartą eksperymentem, wnioski z której na pewno są cenne dla rozwoju badań nad elektroniką strukturalną dla zastosowań praktycznych. Cel pracy został osiągnięty poprzez wytworzenie ścieżek przewodzących o

długości 20 mm i rezystancji poniżej 0,2 Ω . Uwagi/komentarze, które nasunęły mi się w trakcie czytania rozprawy nie mają zasadniczego wpływu na moją pozytywną ocenę pracy.

Wśród elementów nowości naukowej przedstawionych w dysertacji należy wyróżnić:

- W obszarze materiałowym: zastosowanie past przewodzących na bazie srebra (w tym jednej pasty wytworzonej na PW) i miedzi oraz mrówczanu miedzi (II) do wytwarzania ścieżek przewodzących techniką bezpośredniego wytłaczania i połączeń elektrycznych.
- W obszarze materiałowym: próba implementacji jako podłoży polimerowych PLA, ABS, polieteroimidu ULTEM 9085, poliamidu HPPA dla zastosowania metody utwardzania laserowego.
- W obszarze technologicznym: dogłębna i innowacyjna analiza procesu DIW poprzez dobór zarówno optymalnych parametrów technologicznych procesu (w tym wydajność nanoszenia, maksymalna rozdzielczość, opracowano model analityczny opisujący zjawisko nanoszenia bezpośredniego) jak i parametrów reologicznych badanego materiału w celu określenia geometrii ścieżki przewodzącej.
- W obszarze technologicznym: optymalizacja procesu utwardzania laserowego zarówno dla materiałów przewodzących jak i polimerowych stosowanych jako podłoże.
- W obszarze technologicznym: opracowanie metody opartej o sitodruk przy zastosowaniu jako podłoże PET i poliimid Kapton i pasty z nanoproszkiem srebra, otrzymując możliwość drukowania wzorów o różnych kształtach bez konieczności wykonywania nowego sita.
- W obszarze aplikacyjnym: wykonanie połączeń elektrycznych i określenie ich właściwości elektrycznych, mechanicznych i starzeniowych (niezawodność urządzenia i próba interpretacji mechanizmu uszkodzeń zachodzących podczas degradacji).
- W obszarze aplikacyjnym: wykonanie pojemnościowej klawiatury dotykowej sterowanej za pomocą kontrolera Arduino poprzez implementację zaproponowanych rozwiązań technologicznych (DIW, utwardzanie laserowe) i materiałowych (PLA, pasta z nanoAg) w kierunku addytywnego wytworzenia ścieżek przewodzących o przewodności $3,2 \cdot 10^6$ S/m.
- W obszarze ekologicznym: wykonanie zarówno połączeń przewodzących jak i ścieżek przewodzących w oparciu o te same materiały przewodzące na trzech rodzajach podłoży polimerowych (PLA, HPPA, ULTEM) dla elektroniki strukturalnej. W kierunku ograniczenia ilości zużywanych materiałów jak i do poprawy funkcjonowania urządzeń poprzez analizę niezawodności wytworzonych połączeń elektrycznych.

Podsumowując, stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Bartłomieja Wałpuskiego pt.: *Opracowanie metody wytwarzania wysokoprzewodzących ścieżek na potrzeby elektroniki strukturalnej* spełnia wymogi formalne stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę do Rady Naukowej dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektronika Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie go do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Agnieszka Wan