

dr hab. inż. Grzegorz Sobon, prof. uczelni  
Politechnika Wrocławska  
Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów  
Wybrzeże Wyspiańskiego 27  
50-370 Wrocław  
[grzegorz.sobon@pwr.edu.pl](mailto:grzegorz.sobon@pwr.edu.pl)

Wrocław, dn. 30.08.2023 r.

WPLYNEŁO

dn.....2023-09-04.....

## Recenzja rozprawy doktorskiej mgra inż. Bartłomieja Wałpuskiego

zatytułowanej:

*„Opracowanie metody wytwarzania wysokoprzewodzących ścieżek na potrzeby elektroniki strukturalnej”*

Recenzję wykonano na podstawie pisma Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne z dnia 27.06.2023 r.

### 1. Wprowadzenie

Tematyka wytwarzania wysokoprzewodzących ścieżek drukowanych stanowi obecnie jedno z dużych wyzwań elektroniki, szczególnie w kontekście rozwoju elektroniki strukturalnej i elastycznej. Mimo tylu lat rozwoju elektroniki, pewne kwestie technologiczne pozostają nadal nierozwiązane. Na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat uwaga naukowców zwrócona jest w kierunku nowych materiałów z nanocząsteczkami metali, jak np. miedź czy srebro, w formie tuszu lub pasty. Materiały te powinny cechować się wysokim przewodnością elektryczną, niską temperaturą spiekania i dużą adhezją do podłoża. Badania te motywowane są realnymi aplikacjami, które powoli przechodzą ze środowiska laboratoryjnego do realnych zastosowań, takich jak np. strukturalne urządzenia elektroniczne, czy też obwody elastyczne. Oceniana praca doktorska mgra inż. Bartłomieja Wałpuskiego bardzo dobrze wpisuje się w bieżący nurt badań dotyczący opracowania przewodzących i tanich metod wytwarzania ścieżek dla elektroniki strukturalnej. Praca została zrealizowana na Politechnice Warszawskiej w zespole badawczym kierowanym przez dra hab. inż. Marcina Słomę.

### 2. Zawartość pracy

Zagadnienie naukowe rozpatrywane w pracy dotyczy wytwarzania ścieżek przewodzących metodą bezpośredniego wytłaczania i spiekania laserowego. Autor badał wpływ parametrów procesu, takich jak szybkość wytłaczania materiału, moc użytego lasera, czy rodzaj podłoża na właściwości elektryczne wytworzonych ścieżek. Dla niektórych z wytworzonych próbek przeprowadzono również analizy niezawodności. W pracy Autor skupiał się na pastach z nanoproszkami srebra. Bardzo niewielka część pracy poświęcona jest materiałom na bazie miedzi oraz związków metaloorganicznych.

Praca liczy 94 strony (przy czym pierwsze 10 stron stanowią podziękowania, streszczenia, spisy akronimów, etc., a ostatnie 10 stron spis literatury) i jest podzielona aż na 10 rozdziałów. Struktura jest więc dość rozdrobniona, a sama praca objętościowo skromna. Niektóre rozdziały liczą po 3-4 strony. Bibliografia liczy 195 pozycji i w zdecydowanej większości są to odnośniki do artykułów naukowych z ostatniej dekady. Należy więc podkreślić, że Autor przeprowadził

bardzo dogłębną i szczegółową analizę źródeł i niewątpliwie ma duże rozeznanie w aktualnym stanie wiedzy.

Rozdział 1 pracy stanowi krótkie wprowadzenie do tematyki pracy, wyjaśniające różnicę między elektroniką klasyczną a przestrzenną. Uzasadnia konieczność podejmowania swojej tematyki nowymi możliwościami tworzenia nowej generacji urządzeń trójwymiarowych o niskim koszcie produkcji i wysokiej niezawodności.

W rozdziale 2 Autor przedstawia aktualny stan wiedzy dotyczący elektroniki strukturalnej. Dość zwięźle i zrozumiale przedstawione i porównane zostały stosowane metody nanoszenia materiałów przewodzących, wymieniono rodzaje stosowanych materiałów, a następnie sposoby ich utwardzania. Przy każdej z metod omówiono ich wady, zalety i ograniczenia. Na podstawie tej analizy Autor wybrał do swoich badań metodę DIW (ang. Direct Ink Writing), czyli bezpośredniego wyłaczania, oraz utwardzania laserowego.

Rozdział 3, liczący niepełne dwie strony, to przedstawienie celu i zakresu pracy. Zagadnienie naukowe zostało przez Autora dobrze i jasno sformułowane, niemniej jednak, zaskakujące jest, iż Autor sformułował cel i zakres pracy dopiero na 42. stronie pracy, w trzecim rozdziale – zazwyczaj rozprawy doktorskie zaczyna się od zdefiniowania celu i zakresu. Autor nie sformułował natomiast żadnej tezy, co stanowi dla recenzenta spore zaskoczenie. Niemniejsze niż to, że Autor pisze o celach w czasie przyszłym, a przecież już je osiągnął.

W rozdziale 4 Autor przedstawia swoje wyniki eksperymentalne dotyczące parametrów ścieżek z farby wodnej o różnej lepkości nanoszonej na podłoże z różnymi prędkościami i ciśnieniami. Autor określił zakresy prędkości posuwu dyszy oraz ciśnienia, dające najlepsze rezultaty z punktu widzenia późniejszego spiekania. Przedstawił również model pozwalający na określenie szerokości uzyskanej ścieżki w funkcji prędkości posuwu dyszy dla zadanego ciśnienia.

Rozdziały 5 i 6 stanowią zasadniczą część pracy i dotyczą addytywnego wytwarzania ścieżek przewodzących oraz połączeń między elementami, w tym przypadku rezystorami SMD. Autor przedstawia uzyskane wyniki pomiarów przewodności elektrycznej ścieżek wytworzonych z pasty zawierającej nanoproszki i płatki srebra. Wytwarzano ścieżki na czterech rodzajach podłoży: polilaktydu (PLA), akrylonitrylo-butadieno-styrenu (ABS), polieteroimidu (ULTEM 9085), oraz poliamidu (HPPA). Dla każdego z podłoży Autor przeprowadził badania wpływu mocy lasera przy stałej prędkości skanowania wiązką na uzyskane własności elektryczne. Najwyższą przewodność na poziomie  $3 \cdot 10^6$  S/m, uzyskano dla utwardzania z mocą 4,0 W na podłożu z PLA. Autor porównał uzyskane wyniki do innych osiągnięć literaturowych (Tabela nr 4). Używając opisanej metody nanoszenia ścieżek, Autor stworzył również demonstrator pojemnościowej klawiatury dotykowej wykonanej w pełni addytywnie. Następnie Autor przystąpił do badania rezystancji połączeń między elementami elektronicznymi, wykonanych z pasty ze srebrem. Badano 3 rodzaje podłoży: PLA, HPPA i ULTEM oraz dwa rodzaje past (wytworzoną w Politechnice Warszawskiej oraz dostępną komercyjnie). Autor wykazał, że w tym przypadku rodzaj podłoża nie ma dużego wpływu na uzyskaną rezystancję, a większe znaczenie ma rodzaj stosowanego materiału. Co ciekawe, Autor poświęca sporo miejsca opisując badania, które się nie udały i nie przyniosły oczekiwanego rezultatu. To wartościowa cecha, gdyż bardzo często badacze w swoich pracach starają się ukryć lub nie wspomnieć o tym, co im nie wyszło.

Rozdział 7 poświęcony został analizie niezawodności wykonanych próbek ścieżek przewodzących. Badanie polegało na obserwacji degradacji przewodnictwa ścieżek w czasie, w warunkach przyspieszonego starzenia (tj. w podwyższonej temperaturze). Na podstawie pomiaru Autor stwierdził średni czas potrzebny do usterki (MTTF – Mean Time To Failure) dla jednej z grup próbek na 8000 godzin. Mimo, iż rozdział ten jest równie skromny objętościowo jak pozostałe, i nie uzyskano spektakularnych wyników (trudno mówić o niezawodności na tym etapie badań), uważam to za szczególnie istotny punkt badań Autora. Sam fakt, że tego typu badania przeprowadzono, świadczy o dużej świadomości Autora dot. aplikacyjności opracowanej technologii.

W Rozdziale 8 Autor analizował wpływ parametrów termicznych podłoża na przewodność utwardzanych laserowo warstw. Jest to w zasadzie podstawowa czynność, jaką należy wykonać przed przystąpieniem do nanoszenia i utwardzania ścieżek. Zazwyczaj tego typu badania zaczyna się od naświetlania laserem czystego podłoża i zależenia punktu, kiedy następuje zeszklenie czy zniszczenie. Taki test jednoznacznie nakłada już pewne limity dla późniejszych badań z utwardzaniem warstw metalicznych. Dlatego też dziwi umieszczenie tych wyników dopiero w 8. rozdziale.

Ostatnim zagadnieniem podejmowanym przez Autora, opisanym w Rozdziale 9, jest badanie warstw wytworzonych z materiałów na bazie miedzi i związków metaloorganicznych. Wyniki w tym rozdziale są bardzo szczątkowe i trudno je w zasadzie skomentować. Nie ma tutaj żadnej szczegółowej analizy i badań. Analiza ogranicza się jedynie do pokazania dwóch zdjęć mikroskopowych, ukazujące nieudane ścieżki.

### 3. Wartość naukowa prezentowanych rezultatów

Za najważniejsze, samodzielne osiągnięcie Autora należy uznać dostosowanie techniki bezpośredniego wytłaczania oraz spiekania laserowego do wytwarzania ścieżek przewodzących na podłożach „delikatnych”, tj. o niskiej wytrzymałości termicznej. Autor postawił sobie za cel opracowanie technologii wytwarzania ścieżek w procesie przyrostowym (addytywnym), na podłożach kompatybilnych z powszechnymi obecnie drukarkami 3D. Przeprowadzając szereg badań eksperymentalnych, również popartych obliczeniami, Autor zidentyfikował kluczowe parametry procesu laserowego spiekania, jak i parametry podłoża wymagane do poprawnego wytworzenia ścieżki. Autor potwierdził swoje założenie o wpływie przewodności cieplnej podłoża na uzyskane maksymalne konduktywności elektryczne.

Na dorobek naukowy Autora składa się łącznie 9 prac, w tym 4 to wydawnictwa pokonferencyjne, 4 publikacje z listy Filadelfijskiej, i 1 praca spoza listy. Spośród 4 prac Filadelfijskich dwie związane są bezpośrednio z pracą doktorską (i wyniki prezentowane w tych pracach są zawarte w rozprawie) i są to:

[1] *“Accelerated Testing and Reliability of FDM-Based Structural Electronics”* opublikowana w Applied Sciences, cytowana dotychczas 4 razy,

[2] *“Additive Manufacturing of Electronics from Silver Nanopowders Sintered on 3D Printed Low-Temperature Substrates”* w Advanced Engineering Materials, cytowana dotychczas 7 razy.

Na szczególną uwagę zasługuje ta druga praca, opublikowana w bardzo dobrym czasopiśmie wydawanym przez Wiley, o współczynniku IF równym 4,122.

Dorobek publikacyjny doktoranta, biorąc pod uwagę etap kariery oraz reprezentowaną dyscyplinę, należy uznać za dobry. Prezentowaną rozprawę uznaję za wartościową dla nauk inżynierijno-technicznych, gdyż prezentuje oryginalne wyniki, wpisujące się w bieżące trendy w tej dziedzinie. Prace Autora są zauważane przez środowisko, o czym świadczy spora liczba cytowań: łącznie 44, z czego tylko 1 jest bezpośrednio autocytowaniem, a jedynie kilka cytowań pochodzi z grupy badawczej, w której pracuje Autor.

### 4. Uwagi do pracy

Na podstawie lektury pracy, recenzentowi ujawnia się obraz pracowitego badacza, silnie zmotywowanego, który cierpliwie przeprowadza kolejne eksperymenty i nie boi się porażek. Niemniej jednak, rolą recenzenta jest krytyczne spojrzenie na pracę i zwrócenie uwagi na nieścisłości merytoryczne. Podzieliłem je na dwie grupy: zastrzeżenia merytoryczne oraz uwagi redakcyjne i typograficzne.

#### Zastrzeżenia merytoryczne:

1. W rozdziale 4, na Rys. 12 przedstawiono pomiar szerokości ścieżek nanoszonych z różnymi ciśnieniami. Autor komentując wyniki stwierdza, że dla ciśnienia 0,5 bara i prędkości dyszy powyżej 500 mm/min linie nie są ciągłe, oraz że w tym przypadku występuje również

największa różnica między modelem a eksperymentem. Zgodnie z podpisem pod Rys. 12, wyniki dla 0,5 bara umieszczone są na rysunku (c) – nie widać na nim szczególnej różnicy między modelem a eksperymentem. Różnica ta występuje na rysunku (a), który opisany jest jako pomiar dla ciśnienia 1,4 bara. Najprawdopodobniej rysunki są źle podpisane.

2. Dla jednego przypadku (materiał C, ciśnienie 1 bar) model teoretyczny daje wyniki o 0,2 mm większe niż zmierzone. Autor tłumaczy tę różnicę niedokładną nastawą ciśnienia nanoszenia na ręcznym manometrze. To wyjaśnienie nie jest przekonujące, dlaczego akurat w tylko w przypadku tego materiału ciśnienie było nastawione niedokładnie, a w przypadku pozostałych ośmiu pomiarów z użyciem tej samej aparatury było dokładne?
3. W całej pracy w zasadzie pominięta jest kwestia szczegółowej inspekcji struktury wykonanych ścieżek. Analiza nieciągłości i pęknięć opiera się jedynie na zdjęciach mikroskopowych, na których nie da się zobaczyć wystarczająco szczegółowego obrazu, by móc wyciągać jakies wnioski. Dla przykładu, na zdjęciu na Rys. 16 b), ukazującym poprawnie utwardzoną ścieżkę, wyraźnie widać pęknięcia i nieciągłości, co nie zostało przez Autora skomentowane. Na podstawie wykonanych pomiarów trudno jednoznacznie stwierdzić, czy pęknięcia na ścieżkach obserwowane przez Autora wynikają z nieoptymalnego utwardzenia materiału, czy od własności podłoża. Brak jest analizy przekrojów wykonanych ścieżek, co też jest kluczowe dla optymalizacji procesu utwardzania i jest standardem w tego typu pomiarach. Rozczarowujący jest brak choćby jednego zdjęcia z mikroskopu SEM wytworzonej próbki. Analiza przekroju pozwalałaby stwierdzić, czy ścieżka jest utwardzona na całej grubości. W Tabeli nr 4 Autor podaje, że grubość wykonanych ścieżek to 35  $\mu\text{m}$  (są to bardzo grube ścieżki jak na utwardzanie laserowe). Brak jest w pracy informacji, w jaki sposób ta grubość została zmierzona. Ponadto, na stronie 70 Autor pisze: „(...) *plamka lasera ma ok. 200  $\mu\text{m}$  średnicy i oddziałuje z materiałem na głębokości poniżej 1  $\mu\text{m}$* ”. W jaki sposób zatem określono prawidłowe utwardzenie i adhezję do podłoża materiału o grubości 35  $\mu\text{m}$ , skoro laser wnika na głębokość 1  $\mu\text{m}$ ?
4. Autor w pracy kilkakrotnie odwołuje się do adhezji ścieżek do podłoża, używając bardzo nienaukowych i nieprecyzyjnych stwierdzeń typu: „*nadruk charakteryzował się bardzo niską adhezją do podłoża*”, „*dobra adhezja do podłoża*”, „*wystarczająca adhezja do podłoża*”. Stopień adhezji nie został w pracy w żaden sposób skwantyfikowany, ani systematycznie przeanalizowany. W zasadzie brak jest badań wpływu parametrów procesu na adhezję, co jest kluczowe dla tej technologii. Jest to dość zaskakujące, zwłaszcza, że istnieją ustandaryzowane testy adhezji (np. ASTM D-3359) powszechnie stosowany przez autorów innych badań, do testowania adhezji ścieżek przewodzących na różnych podłożach.
5. W rozdziale 3 „Cel i zakres pracy”, Autor pisze: „*Opracowany zostanie także cały proces utwardzania laserowego, począwszy od wyboru lasera o odpowiedniej mocy, długości fali i trybie pracy*”, co nie znajduje odzwierciedlenia w przedstawionych badaniach. Nie ma w pracy żadnej analizy wpływu długości fali czy trybu pracy na uzyskane parametry. Autor arbitralnie wybrał laser półprzewodnikowy pracy ciągłej, o długości fali 980 nm i mocy maksymalnej 10W (zapewne z powodu łatwej dostępności komercyjnej i bardzo niskiej cenie takich laserów). Nie wiadomo jak wygląda profil wiązki i czy składa się pojedynczego modu poprzecznego. Autor podaje jedynie informację o średnicy plamki wynoszącej 200  $\mu\text{m}$  (nie wiadomo, czy jest to wartość zmierzona). Całkowicie pominięto takie zagadnienia jak wpływ rozmiaru plamki (tj. pozycji próbki względem ogniska wiązki), profilu natężenia wiązki na uzyskane wyniki, czy wpływ tzw. hatchingu (tj. pokrywania się obszarów oświetlanych laserem). Autor przyjął arbitralnie jedną wartość hatchingu (Rys. 14(a)). Tego typu analiza jest w zasadzie podstawą w jakichkolwiek zagadnieniach związanych z laserową obróbką materiałów.

6. Niemal każdy wykres w pracy prezentujący wyniki pomiaru przewodności w funkcji jakiegoś parametru (np. mocy lasera) posiada słupki błędów, jednakże, nigdzie w pracy Autor nie wyjaśnia na jakiej podstawie zostały one obliczone. Zastanawia również różny styl ich rysowania (np., inny na rys. 24 i 25, a inny na rys. 17 czy 20).

#### Uwagi redakcyjne i typograficzne:

1. Strona 11: „W latach 60. powstało (...)” – recenzent podejrzewa, że chodziło o lata 60. XX wieku
2. Strona 21 oraz 33: zapis jednostki „Mhz”, „Ghz” zamiast „MHz”, „GHz”
3. Strona 44: „(...) na wiskozymetrze stożkowych (...)” zamiast „stożkowym”
4. Strona 48: Autor używa słowa „uchyb” w kontekście różnicy między wartością zmierzoną eksperymentalnie, a obliczoną teoretycznie („Ten uchyb został spowodowany (...)”). Powinien użyć po prostu stwierdzenia rozbieżność, różnica, itp.
5. Strona 54: „naniesionej po podłożu” – powinno być: „naniesionej na podłożu”
6. Strona 59, niegramatyczne zdanie: „Połączenia takie poza zarówno utrzymują komponenty w odpowiednim miejscu (...)”
7. Na stronie 65 Autor pisze: „Największa grupa (C) była ponad trzykrotnie większa od najmniejszej (B)”. Według danych z Tabeli 5, grupa C liczyła 35 próbek, a grupa B – 14 próbek. Wg wszelkich obowiązujących praw matematyki, 35 nigdy nie będzie ponad trzykrotnie większe niż 14.
8. Co najmniej kilka rysunków w pracy w ogóle nie jest wywołanych w tekście (np. Rys. 14, 19, 20).
9. Czytanie pracy jest utrudnione przez bardzo ubogie podpisy rysunków. Dla przykładu, Rys. 19 składa się z czterech fotografii ukazujących poszczególne kroki „jakiegoś” procesu technologicznego. Rysunek podpisany został: „Poszczególne etapy opracowanej metody szybkiego prototypowania elektroniki drukowanej”. Niestety, zupełnie nie wiadomo co się na poszczególnych etapach dzieje, gdyż nie zostało to wyjaśnione ani w podpisie rysunku, ani w tekście pracy (Autor w ogóle nie odwołuje się do tego rysunku).

Należy podkreślić, iż powyższe uwagi edytorskie utrudniają odbiór pracy i prawdopodobnie wynikają z pośpiechu w jej pisaniu. Nie umniejszają one jednak oczywiście walorów naukowych.

#### 5. Podsumowanie

Podsumowując, praca mgr inż. Bartłomieja Wałpuskiego przedstawia oryginalne wyniki naukowe, wnoszące nową wiedzę do dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne. Autor rozwiązał postawione problemy naukowe i osiągnął stawiane cele. Mimo pewnych uchybień merytorycznych i edytorskich, moja ogólna ocena przedstawionej do recenzji pracy jest **pozytywna**. W mojej opinii, praca spełnia zwyczajowe oraz ustawowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim, może być zatem podstawą do ubiegania się o stopień doktora nauk technicznych. W związku z powyższym wnoszę o dopuszczenie Autora do kolejnych etapów przewodu doktorskiego.

