

Gdańsk, 21.08.2023

## Recenzja

WPLYNĘŁO

rozprawy doktorskiej mgr inż. Bartłomieja Podsiadły dn. 2023 -09- 0 4

**pt. „Opracowanie i badania właściwości materiałów kompozytowych do wytwarzania obwodów elektroniki strukturalnej technikami przyrostowymi”**

Podstawą formalną dla przygotowania recenzji omawianej rozprawy doktorskiej stanowiło pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika oraz Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej prof. dr hab. inż. Tomasza Stareckiego. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Marcin Słoma.

### 1. Rozpatrywane zagadnienie naukowo-badawcze

Praca doktorska skupia się na opracowaniu i badaniu właściwości materiałów kompozytowych przeznaczonych do zastosowania w elektronice strukturalnej, wytwarzanych za pomocą technologii FDM. Badania obejmują analizę oraz dobór odpowiednich materiałów polimerowych i faz funkcjonalnych, a także opracowanie metod mieszania, homogenizacji i wyłaczania kompozytów. Przygotowane kompozyty były poddawane testom w procesie druku 3D oraz ocenie ich funkcji w praktycznych zastosowaniach.

Obrany temat jest niezwykle obszerny i wpisuje się w nowy zakres badań w dziedzinie elektroniki, koncentrujący się na rozwijaniu technik addytywnych oraz zaawansowanych materiałów kompozytowych. Wykorzystanie tych rozwiązań otwiera możliwości do nowego sposobu wytwarzania obwodów elektronicznych, znanych jako elektronika strukturalna.

Doktorant skupia się w pracy na procesach wytwarzania polimerowych materiałów kompozytowych z fazą funkcjonalną zarówno w postaci proszków metali, jak i struktur węglowych. W ramach badań wykorzystuje różne rodzaje osnów polimerowych, w tym elastomerów.

---

#### Kontakt:

dr hab. inż. Robert Bogdanowicz prof. PG  
Tel +48 58 3471503 | email: rbogdan@eti.pg.edu.pl  
Fax +48 58 3471848 | <http://diamondized.eu>

Ponieważ opracowane materiały mają zastosowania elektroniczne, to Doktorant wiele uwagi poświęca badaniom właściwości elektrycznych kompozytów, takich jak przewodność elektryczna czy typ przewodnictwa. Dodatkowo w pracy przeprowadza cykl badawczy dotyczący wykonywania połączeń lutowanych na podłożach kompozytowych.

Doktorant podejmuje w rozprawie tematykę wytwarzania drukowalnych kompozytów niezwykle kompleksowo, zajmując się technologią wytwarzania, tworzenia i testowania ich funkcjonalności. Podejmowana tematyka jest niezwykle ważna i aktualna ze względu na panujące trendy dotyczące technik addytywnych oraz wysokie koszty produkcji krzemowych układów, co sprawia, że skalowanie prostych układów elektronicznych jest trudne i kosztochłonne.

**Nadrzędnym celem pracy i problemem naukowym stawianym w rozprawie było opracowanie nowego materiału dla elementów elektroniki strukturalnej. Ten rozbudowany i szeroki cel został doprecyzowany i rozpisany na 8 składowych celów szczegółowych skupionych na konkretnych tezach i testujących je eksperymentach. Pragnę zatem na tej podstawie stwierdzić, że sformułowane cele są w pełni mierzalne, mają głęboki wymiar naukowy i są nowe w stosunku do efektów raportowanych w literaturze światowej.**

Doktorant podjął się rozwiązania problemu wytwarzania zaawansowanych układów elektronicznych minimalizując konieczność korzystania ze złożonych urządzeń wyposażonych w wiele, zupełnie różnych modułów odpowiedzialnych za różne technologie. Założeniem elektroniki strukturalnej jest to, aby stosowane materiały oraz techniki pozwalały na wytwarzanie takich elementów, które mimo posiadania właściwości funkcjonalnych jednocześnie mogły odpowiadać za wytrzymałość, sztywność oraz odporność na uszkodzenia. Opracowane kompozyty i wydruki o wyższej rozdzielczości pozwolą na wytwarzanie zaawansowanych układów elektroniki o wysokim stopniu upakowania i złożonych kształtach. Doktorant łączy zastosowanie technik przyrostowych oraz polimerowych materiałów funkcjonalnych rozwijając układy elektroniki zagrzebanej, również w konwencji elementów wbudowanych.

**Pragnę podkreślić, że przedstawiony problem naukowy stanowi wyzwanie o ambitnym i oryginalnym charakterze. W procesie eksploracji różnych materiałów kompozytowych – zarówno pod względem technologicznym, jak i eksperymentalnym – autor był zmuszony stawić czoła trudnemu zadaniu, wymagającemu zaawansowanej wiedzy z obszarów inżynierii**

materiałowej, chemii, elektroniki oraz mechaniki. Dodatkowo, autor musiał wykazać się umiejętnościami analizy procesów termicznych w materiałach polimerowych oraz głębokim zrozumieniem zjawisk odpowiadających za obserwowane efekty.

## **2. Analiza źródeł, w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle**

Doktorant dokonał wnikliwego przeglądu naukowej literatury światowej oraz produktów komercyjnych dostępnych na rynku. Dowodem na to jest przywołanie 102 przypisów w przeglądzie stanu wiedzy w zakresie realizowanej rozprawy doktorskiej. Zakres analizy dotyczy technologii FDM, doboru materiałów i osnów polimerowych oraz przygotowania tych materiałów do wydruku (homogenizacja, wytłaczanie). Przegląd skupia się na hybrydowych rozwiązaniach połączenia elastycznej elektroniki z elementami drukowanymi, łącząc tradycyjne układy scalone z technikami addytywnymi.

Autor realizując tak szeroki przegląd stanu wiedzy i zastosowań w praktyce wykazał się wiedzą z zakresu elektroniki, elektrotechniki, inżynierii materiałowej, fizyki i chemii. Szczegółowo przeanalizował status metod tworzenia nowych układów elektronicznych charakteryzujących się wyższą sprawnością, mniejszym zużyciem energii oraz udoskonalonymi funkcjami w porównaniu do rozwiązań już obecnych na rynku. Pokazał, że elementy elektroniki strukturalnej charakteryzują się specyficzną strukturą mechaniczną, jak i funkcjonalną w zakresie aplikacji elektronicznych.

## **3. Rozwiązanie postawionych zagadnień badawczych: metody i efekty**

Autor w krótkim ale kompletnym przeglądzie wyników przedstawił szereg opracowanych materiałów kompozytowych dedykowanych i testowanych przy użyciu technik przyrostowych oraz zademonstrowanych w elementach elektroniki strukturalnej (np.: przewodzące nici, drukowane układy elektroniczne lub LED). Przedstawione wyniki wskazują, że prawidłowo scharakteryzowano właściwości elektryczne materiałów z użyciem metody 4-punktowej oraz przedstawiono ich struktury używając SEM.

W ramach prowadzonych badań opracowano metody wytwarzania polimerowych materiałów kompozytowych z napełniaczami w postaci proszków metali ale również w postaci struktur węglowych. W badaniach z powodzeniem Doktorant wykorzystał wiele rodzajów osnów polimerowych, zarówno elastycznych jak i nieelastycznych. **Do najważniejszych osiągnięć pragnę zaliczyć: (i) opracowanie metody wytwarzania kompozytów polimerowo-metalicznych o wysokiej zawartości napełniacza, (II) wytworzenie kompozytów polimerowo-metalicznych o wysokiej przewodności do zastosowania w technologii FDM oraz (III) opracowanie technik wykonywania połączeń lutowanych na podłożach kompozytowych.** Doktorant, do badania opracowanych materiałów, wykorzystał zaawansowane narzędzia pomiarowe. W ramach realizacji prac badawczych potwierdził uzyskane parametry elektrod za pomocą pomiarów elektrycznych.

#### 4. Oryginalność rozprawy oraz samodzielny i oryginalny dorobek autora

Rozprawa doktorska bazuje na oryginalnych osiągnięciach Doktoranta przedstawionych skrótowo w rozdziale „Wyniki” i potwierdzonych autorskim dorobkiem publikacyjnym składającym się z 16 pozycji publikacyjnych (11 publikacji JCR oraz 6 materiałów konferencyjnych) z czego 6 publikacji JCR i 3 komunikaty konferencyjne są bezpośrednio związane z tematem rozprawy. Autor przedstawił odpowiednie oświadczenia współautorów wykazując jego wiodącą rolę w powiązanych z rozprawą publikacjach. Pragnę wskazać, że niestety z 11 przedstawionych publikacji JCR aż 10 prac jest opublikowanych w wydawnictwie MDPI. Prace te są wysokiej jakości i można było je opublikować w periodykach o wyższych współczynnikach wpływu i w czasopismach pozycjonowanych wyżej w rankingach naukowych.

Doktorant zaprezentował zoptymalizowane metody homogenizacji kompozytów o jednorodnych właściwościach w publikacjach [K1], [K4], [K5] oraz [P1], gdzie fazę funkcjonalną stanowiły proszki metali. W tych pracach zostały pokazane przewodzące włókna z proszkami metali, tj. miedzi oraz niklu. Na ich bazie wytworzono przyrostowo obwody elektryczne z LED [P5] lub klawiaturę pojemnościową [P1]. W artykułach [K5] oraz [P1] raportowano właściwości elektryczne kompozytów. Natomiast w publikacjach [P3], [P6] oraz [P9] zademonstrowano włókna opracowane na bazie struktur węglowych (nanorurek węglowych lub grafitu). Wykazano, że wybrane materiały węglowe charakteryzują się zdecydowanie mniejszymi wymiarami, niższą gęstością oraz większą

---

Kontakt:

dr hab. inż. Robert Bogdanowicz prof. PG  
Tel +48 58 3471503 | email: rbogdan@eti.pg.edu.pl  
Fax +48 58 3471848 | <http://diamondized.eu>

powierzchnią właściwą w porównaniu z cząsteczkami metalicznymi. W ramach tych badań zaprezentowano sensoryczne włókno kompozytowe wszyte w bawełnianą rękawiczkę zasilane [P9].

W pracach [K4], [K5], [P1], [P5] przedstawione przykłady druku elementów były uzyskane z wykorzystaniem kompozytów funkcjonalnych w osnowach z ABS, PLA oraz PS. Dodatkowo w [P5] przedstawiono proces lutowania na wytwarzanych przyrostowo podłożach kompozytowych w celu umożliwienia wytwarzania połączeń elektrycznych o wysokiej wytrzymałości i przewodności.

W publikacjach [P3] oraz [P9] przedstawiono metody wytwarzania włókien kompozytowych o wysokiej elastyczności na bazie struktur węglowych, tj. nanorurek węglowych i grafitu oraz osnowy elastycznej SBS. W [P10] został zaprezentowany problem wytwarzania metalicznych ścieżek elektrycznych z wykorzystaniem technologii FDM, gdzie zademonstrowano funkcjonujący wydrukowany przyrostowo obwód elektroniczny ze ścieżkami wykonanymi ze stopu lutowniczego. W [P11] przedstawione zostały badania wpływu parametrów druku w technologii FDM na właściwości przewodzące wydrukowanych elementów kompozytowych.

**Na podstawie przedstawionych wyników, stwierdzam, że doktorant osiągnął interesujące wyniki z punktu widzenia zastosowania materiałów i założonych celów pracy uzyskując nowe efekty i opis zjawisk nie raportowanych dotychczas w literaturze. Opracowane badania i publikacje stanowią samodzielny i oryginalny dorobek autora, który jest znacząco nowy w stosunku do stanu wiedzy i poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową. Rozwiązany problem badawczy jest nowatorski i aktualny, koncentruje się na dogłębnej analizie metod syntezy przewodzących materiałów kompozytowych oraz określeniu ich parametrów elektrycznych jak i mechanizmów przewodzenia i perkolacji. Rozważany problem jest obecny w literaturze, ale liczba prac dotyczących praktycznych zastosowań takich rozwiązań w hybrydowych układach elektronicznych jest jednak ograniczona. Pragnę zatem podkreślić, że zaproponowane i potwierdzone eksperymentalnie rozwiązania mają ogromne znaczenie dla coraz większej liczby spersonalizowanych urządzeń noszonych na ciele czy prostych sensorów do zastosowań przemysłowych, wykazując przydatność tych badań dla nauk inżynierjno-technicznych.**

## 5. Charakterystyka i ocena edycyjnej strony rozprawy doktorskiej

Skrótowa rozprawa oparta na recenzowanych publikacjach naukowych została napisana w języku polskim. Praca obejmuje 65 stron maszynopisu podzielonych na 4 rozdziały, zawierających 25 rysunków oraz 126 pozycji bibliograficznych. Zebrane materiały analityczne i badawcze są obszerne oraz świadczą o znacznym wysiłku włożonym przez Doktoranta w proces realizacji i przygotowania rozprawy.

We wstępnym rozdziale, Autor kompleksowo przedstawił zakres przeprowadzonych badań, precyzyjnie określił problem badawczy oraz przedstawił motywację, która skłoniła go do podjęcia tego tematu. W drugim rozdziale dokładnie i klarownie zdefiniowano cel badawczy. W trzecim rozdziale, Doktorant wprowadza czytelnika w aktualny stan wiedzy związany z tematem pracy, udowadniając swoją szeroką znajomość zagadnień i omawianych aspektów zarówno w kontekście badań podstawowych, jak i praktycznych rozwiązań aplikacyjnych.

Do najważniejszych i wartościowych naukowo części rozprawy zaliczam rozdział 4, który szczegółowo opisuje przegląd uzyskanych i opublikowanych wyników prac badawczych. Autor podsumowuje pracę, akcentując osiągnięte wyniki, które potwierdzają zrealizowanie założonych celów i tez. Ponadto, wskazuje na perspektywiczne eksperymenty badawcze, które mogą kontynuować i rozwijać osiągnięcia przedstawione w pracy.

Przedstawiona rozprawa została starannie przygotowana pod względem redakcyjnym. Rysunki i tabele są czytelne i większość z nich została odpowiednio omówiona i zilustrowana w tekście. Autor płynnie operuje specjalistyczną terminologią, co umożliwia płynne czytanie manuskryptu bez przeszkód oraz z pełnym zainteresowaniem. Nie skupiam się na sporadycznych błędach redakcyjnych, jako że nie mają one istotnego wpływu na ogólne zrozumienie pracy. Co do przedstawionych wyników, proszę autora o bardziej szczegółową dyskusję oraz informacje na następujące zagadnienia:

*(Strona 31) W tym fragmencie brak jasnego związku 3.2 z 3.3. Rozdział 3.3 wyraźnie nie nawiązuje do reszty treści. Proszę o informację, czy Doktorant prowadził eksperymenty wytlaczania?*

*(Strona 36) Autor stosuje różne style opisu wykresów. Proszę zaprezentowanie na obronie spójnych danych wraz z pokazaniem błędów. Czy badano perkolacje w funkcji stopnia krystaliczności np. z użyciem TGA-DSC?*

---

Kontakt:

dr hab. inż. Robert Bogdanowicz prof. PG  
Tel +48 58 3471503 | email: rbogdan@eti.pg.edu.pl  
Fax +48 58 3471848 | http://diamondized.eu

*(Strona 36) Proszę o opis geometrii próbek stosowanych w pomiarach przewodności. Czy stosowano tu metodę sondy 4-punktowej? Czy stosowano współczynniki korekcyjne? Jak oceniano grubości próbek?*

*(Strona 40 i 41) Proszę o dyskusję z czego wynika uskok na Rysunku 7b. Czy badano charakterystyki  $R(T)$  tych materiałów? Czy podczas pomiarów  $I/V$  badano temperatury próbek? Proszę wyjaśnić nieliniowy charakter  $R(U)$  na Rysunku 8. Jakie zjawisko za tym stoi? Zmiany ścieżek perkolacji lub modyfikacja kompozytu?*

*(Strona 42) Proszę o wyjaśnienie zmian obserwowanych na Fig 9ab. Co się dzieje przy 15V? Jaki prąd tam płynie? Co się dzieje z kompozytem przy zbyt wysokiej mocy elektrycznej i czy ten proces jest odwracalny. Jak tak to ile razy?*

*(Strona 44) Czy badano parametry elektryczne przed i po rozciągnięciu próbek?*

*(Strona 50) Brak jasnego połączenia Tabeli 3 i Rysunku 14. Proszę o wyjaśnienia i dyskusję.*

*(Strona 61) Z czego wynika spadek eksponenty sygnału po uzyskaniu maksimum?*

*(Strona 63) Proszę porównać połączenia lutowane ze wtapianiem elementów w matrycę kompozytu.*

*(Strony 58-63) Brak opisu i deklaracji kto wykonał te układy. Kto był za to odpowiedzialny? Jak była rola Doktoranta w tych pracach?*

**Pomijając wspomniane uwagi i komentarze, pragnę jednoznacznie stwierdzić, że niniejsza rozprawa prezentuje wysoki poziom naukowy. Jej treść jest starannie opracowana, a przedstawione wyniki badań są rzetelne i wartościowe. Autor pracy wykazuje dogłębną wiedzę na temat omawianego obszaru i prezentuje argumenty poparte solidnymi analizami. Zważywszy na te aspekty, rozprawa zasługuje na pozytywną ocenę.**

#### **4. Wnioski końcowe**

Pragnę podsumować, że Doktorant z powodzeniem zrealizował plan badawczy, potwierdzając wytyczone tezy oraz osiągając zamierzony cel swojej pracy doktorskiej. W tym procesie wykorzystał zaawansowane technologie materiałowe oraz precyzyjne metody metrologiczne. Prezentowana

---

Kontakt:

dr hab. inż. Robert Bogdanowicz prof. PG  
Tel +48 58 3471503 | email: rbogdan@eti.pg.edu.pl  
Fax +48 58 3471848 | http://diamondized.eu

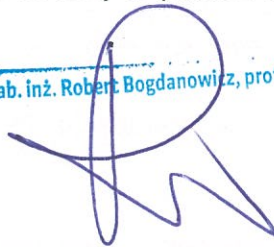


rozprawa doktorska wyróżnia się znaczącym poziomem innowacyjności, co znakomicie potwierdzają dołączone do niej publikacje Autora.

Opracowane materiały oraz układy, którymi się zajął, wykazują nie tylko istotne wartości poznawcze, ale także praktyczne zastosowanie. Osiągnięcia te stanowią ważny wkład w dyscyplinę *Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika oraz Technologie Kosmiczne* i posiadają potencjał do dalszych zastosowań. Badania Doktoranta są wyrazem zaawansowanego podejścia do tematu oraz umiejętności wykorzystania nowoczesnych technologii addytywnych w celu osiągnięcia konkretnych rezultatów dla elektroniki.

Biorąc pod uwagę wnioski przedstawione w recenzji, mogę stwierdzić, że omawiana rozprawa mgr inż. Bartłomieja Podsiadły pt. *„Opracowanie i badania właściwości materiałów kompozytowych do wytwarzania obwodów elektroniki strukturalnej technikami przyrostowymi”* spełnia wymagania z wyraźnym nadmiarem określone w artykule 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 Prawo o szkolnictwie wyższym. W związku z tym wnioskuję do Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika oraz Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie rozprawy doktorskiej do publicznej obrony.

dr hab. inż. Robert Bogdanowicz, prof. PG



dr hab. inż. Robert Bogdanowicz prof. PG