

Prof. dr hab. Tadeusz PISARKIEWICZ  
Instytut Elektroniki  
Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji  
Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica  
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Kraków 17.11.2024

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ  
DLA RADY DYSCYPLINY NAUKOWEJ AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA,  
ELEKTROTECHNIKA I TECHNOLOGIE KOSMICZNE  
POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ**

**Tytuł rozprawy:**

***Opracowanie instalacji do wytwarzania materiałów aktywowanych  
chemicznie do zastosowań w technikach addytywnych***

**Autor rozprawy:**

***mgr inż. Jakub Aniulis***

**1. Analiza stanu wiedzy związanej z przedmiotem rozprawy**

Techniki addytywne są alternatywą dla subtraktywnych technik obróbczych w obszarze wspomaganych komputerowo technik wytwarzania i ich popularność rośnie. Tworzenie nowego prototypu jest procesem wieloetapowym, gdzie każdy etap wymaga testowania czy dane rozwiązanie spełnia wymagania stawiane projektowi. Druk 3D osadzania topionego materiału pozwala na szybką i bezkosztową realizację nowego prototypu.

W zależności od pożądanego efektu końcowego poziom trudności w zastosowaniach przy technikach addytywnych będzie w dużej mierze zależał od właściwości materiałów aktywowanych chemicznie. Aby dany materiał mógł być użyty przy wykorzystaniu technik addytywnych należy odpowiednio dobrać jego składniki i zoptymalizować ich proporcje oraz parametry procesu produkcyjnego pod kątem zastosowań w konkretnej technologii wytwarzania. Początkowy skład materiału powinien być zoptymalizowany pod względem skuteczności kluczowego składnika w konkretnym zastosowaniu oraz nośnika, który pozwoli na zastosowanie danego materiału w technikach addytywnych.

Typowa drukarka 3D osadzania topionego materiału składa się ekstrudera, stołu grzewczego, mechanizmu poruszającego stół względem ekstrudera w co najmniej 3 osiach i jednostki sterującej. Aby umożliwić depozycję materiału na stole lub poprzednio nałożonej warstwie, ekstruder posiada element grzejny pozwalający na upłynnienie filamentu, dyszę która jest podgrzewana oraz jednostkę napędową najczęściej w formie silnika krokowego, co pozwala na dozowanie materiału wraz z zachodzącym procesem druku. Filament używany w drukarkach 3D występuje najczęściej w formie nici o stałej średnicy nawiniętej na szpulę.

Jednym z czynników prowadzących do niespójności i wad produkowanych części jest nieskompensowana zmiana właściwości materiału stosowanego w procesie wytłaczania materiału w druku 3D. Istnieje zatem potrzeba monitorowania jakości filamentu w czasie rzeczywistym na całej jego długości. Można to osiągnąć poprzez śledzenie zmian pojemności dedykowanego kondensatora i średnicy przy użyciu różnych typów czujników dla wybranych osi symetrii filamentu oraz rejestracji wyników dla określonego fragmentu filamentu używanego w druku 3D. W ten sposób możliwe jest monitorowanie takich czynników jak poziom zawilgocenia materiału, krągłość, defekty wewnętrzne i zewnętrzne, proporcje składników, względna przenikalność elektryczna, współczynnik Poissona i rodzaj materiału. W recenzowanej pracy przedstawiony jest pierwszy prototyp takiego urządzenia i szczegółowo opisana jest jego zasada działania.

## 2. Cel rozprawy

Celem rozprawy wg. doktoranta było:

- Przygotowanie instalacji do wytwarzania materiałów aktywowanych chemicznie do zastosowań w technikach addytywnych takich jak druk 3D typu Fused Deposition Modeling (FDM),
- Zaprojektowanie, budowa i optymalizacja aparatury pomiarowej do charakteryzacji materiałów aktywowanych chemicznie w formie filamentu zarówno podczas procesu wytwarzania jak i po jego zakończeniu,
- Opracowanie i weryfikacja eksperymentalna przygotowanych autorskich układów elektronicznych odpowiadających za działanie poszczególnych modułów pomiarowych,
- Zbadanie własności materiałów w formie filamentu i ich porównanie z metodami referencyjnymi,
- Praktyczne wykorzystanie powstałej instalacji przy wytwarzaniu materiałów aktywowanych chemicznie do zastosowań w technikach addytywnych w formie filamentu dla drukarek 3D typu FDM,
- Realizacja i charakteryzacja autorskiej metody redukcji średnicy filamentów użytej w instalacji do wytwarzania materiałów aktywowanych chemicznie.

W rezultacie sformułowana została następująca teza:

*Na podstawie enkodowanych pomiarów filamentu: średnicy mierzonej metodą optyczną i kompresyjnymi łożyskami, wieloosiowej pojemności, analizy widma ultradźwiękowego oraz optycznej spektroskopii transmisyjnej i emisyjnej, możliwa jest wzdluzna charakteryzacja filamentu produkowanego do druku 3D osadzania topionego materiału i pomiar jego istotnych parametrów: względnej przenikalności elektrycznej, krągłości, defektów strukturalnych, poziomu zawilgocenia materiału, proporcji składników, współczynnika Poissona, a także możliwa jest klasyfikacja materiału.*



### 3. Realizacja rozprawy

Praca składa się z 5 rozdziałów, wprowadzenia i zakończenia. Cytowana bibliografia to 181 pozycji literaturowych w tym 3 pozycje z udziałem autora.

W rozdziale 2 następuje teoretyczne wprowadzenie do druku 3D metodą Fused Deposition Modeling z uwzględnieniem cyklu życia filamentu będącego materiałem używanym do druku 3D. Omówiono aspekty monitorowania właściwości materiału w formie filamentu wzdłuż jego długości w czasie rzeczywistym z wysoką dokładnością pomiaru. Przedstawiono zalety omawianej metodologii, w tym możliwości monitorowania parametrów procesu i parametrów jakościowych procesów wytłaczania materiałów do druku 3D. W rezultacie sformułowano ideę zautomatyzowanego nieniszczącego monitorowania właściwości materiału filamentu w oparciu o przenikalność elektryczną, enkodowanie wzdłużne i wieloosiowe pomiary średnicy w czasie rzeczywistym.

Rozdział 3 omawia realizację zautomatyzowanego, nieniszczącego układu pomiarowego do monitorowania właściwości materiałowych filamentów w czasie rzeczywistym. Podana została implementacja w formie konfiguracji z czujnikami umieszczonymi szeregowo z odstępami o stałych znanych odległościach, co pozwala na monitorowanie położenia wzdłużnego filamentu w systemie. W rozdziale przedstawiono zasadę działania poszczególnych modułów pomiarowych wraz z ich topologią. Omówiono podstawy metodologii pomiarowych poszczególnych modułów wraz z towarzyszącymi rysunkami. Zjawiska potencjalnie generujące błędy pomiarowe zostały zebrane i przedstawione. Metodyka pomiarowa uwzględniająca dane zebrane z wielu sensorów została omówiona i wyjaśniona.

Rozdział 4 poświęcono teorii, symulacji i kalibracji układów pomiarowych i wytwarzania. Kalibracje poszczególnych modułów w oparciu o podstawy teoretyczne i przeprowadzone symulacje zostały zestawione i przedyskutowane. Poszczególne symulacje zawierające analizę wpływów rozmaitych czynników obecnych w systemie pomiarowym zostały przedstawione. Metodologia obróbki danych z sensorów została omówiona. Przykładowe charakterystyki wygenerowane przy użyciu zaprezentowanej aparatury pomiarowej zostały poddane szczegółowej analizie. Poszczególne etapy obróbki danych zostały przedstawione i porównane względem siebie. Analiza błędów pomiarowych występujących w układzie pomiarowym wraz ze sposobami ich redukcji na podstawie pomiarów pomocniczych została przedstawiona i przeanalizowana. Dokładności pomiarowe poszczególnych modułów i układów zostały oszacowane. Metody użyte przy wytwarzaniu materiałów do druku 3D metodą FDM zostały przedstawione.

Rozdział 5 jest dopełnieniem badań poprzednio opisanych. Podano w nim metodologię pomiaru właściwości filamentów w formie zautomatyzowanego, nieniszczącego monitorowania cech materiałów w oparciu o przenikalność elektryczną, enkodowanie wzdłużne i wieloosiowe pomiary średnicy w czasie rzeczywistym. Przedstawiono również pomiary wykonane modułami ultradźwiękowymi i optycznymi. Omówiono przeprowadzone pomiary setek różnych próbek materiałów powszechnie używanych w technologii addytywnej osadzania topionego materiału. Na podstawie wykonanych pomiarów materiały zostały pogrupowane ze względu na bazę w formie poszczególnych polimerów i ich parametry materiałowe zostały poddane szczegółowej analizie. Każda próbka została kilkakrotnie

zmierzona dla danego odcinka materiału i pod różnymi kątami. Analizując próbki z dokładnie tego samego materiału sprawdzono zdolność metod pomiarowych do oceny jakości wykonania filamentu.

W rozdziale 6 przedstawiono całokształt instalacji do wytwarzania materiałów aktywowanych chemicznie w trakcie działania. Omówiono metody kontroli i korekcji kluczowych właściwości filamentu, przeanalizowano nowatorskie metody pozwalające na rozwiązanie występujących problemów, obejmujące między innymi monitorowanie jakości filamentu w czasie rzeczywistym, testy rozciągania filamentu i redukcję jego średnicy za pomocą wytłaczania w stanie stałym. Właściwości fizykochemiczne wytworzonych materiałów w postaci filamentów zostały zmierzone metodami referencyjnymi opartymi na punktowych próbkach z wybranych fragmentów filamentu i porównane z nowatorską techniką *Real-Time Filament Quality Monitor*. Analizie została poddana między innymi zawartość napełniacza HAp w uzyskanym kompozycie i wpływ krystaliczności na właściwości materiału. Szczegółowo przedstawiono cykl życia filamentów używanych do druku 3D metodą FDM, od początkowych etapów bazowych składników w formie dostarczonego surowca, do ostatecznego wykorzystania filamentu w postaci wydrukowanych obiektów 3D.

#### 4. Najważniejsze osiągnięcia autora rozprawy

- Dwie współautorskie publikacje w czasopiśmie z listy filadelfijskiej *Additive Manufacturing* gdzie występuje jako pierwszy autor.
- Zgłoszenie patentowe: Jakub Aniulis, „Układ do pomiaru względnej przenikalności dielektrycznej materiału” stosowanego w urządzeniu wytwarzania przyrostowego” oraz wieloautorskie zgłoszenie patentowe: „Zestaw do wykrywania wirusa grypy zawierający bufor, linker oraz sekwencję aminokwasową oraz sposób detekcji”, Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej, 2021, P.431069.
- Cztery referaty konferencyjne: 2 konferencje międzynarodowe (7th European Congress on 3D Printing & Additive Manufacturing, Paris France 2022, 9th ICAM 2024 ASTM International Conference on Advanced Manufacturing Research, Atlanta, GA, USA, 2024) oraz 2 krajowe (Interdisciplinary Doctoral Symposium, Rajd Doktoranta 2023, Przesieka 2023, V Krajowa Konferencja Naukowa Szybkie Prototypowanie Druk 3D & 4D w zastosowaniach inżynierskich, Centrum Kongresowe Targów Kielce, 2022).
- Nagroda PRIMUS przyznawana przez Dział Nauki Politechniki Wrocławskiej w ramach premiowania publikacji najwyższej punktowanych na całej uczelni, 2024.
- Udział w 4 projektach badawczych:
  - „Prace badawczo rozwojowe nad innowacyjnym, ultraczułym, szybkim i tanim miniaturowym testem do wykrywania wirusa grypy – FLUSENSOR” – RPO Woj. Mazowieckiego na lata 2014-2020;
  - „Prace badawczo-rozwojowe nad innowacyjnym, szybkim i tanim testem do wykrywania *Streptococcus pyogenes* i *pneumoniae* wraz z identyfikacją oporności na



antybiotyki” – Program Operacyjny Inteligentny Rozwój, Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego, NCBR;

„EquineDx - szybki test do wykrywania patogenów u koni” – Program Operacyjny Inteligentny Rozwój, Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego, NCBR;

“Prace badawczo-rozwojowe nad opracowaniem prototypu MULTISENSORA – innowacyjnego mikroczipa do różnicowania bakteryjnej lub wirusowej etiologii infekcji górnych dróg oddechowych” – Program Operacyjny Inteligentny Rozwój, Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego, NCBR.

- Komercyjna współpraca:
  - Jakub Aniulis, “Electronic Engineering Team Leader”, pełen etat, SendDx S. A.
  - Jakub Aniulis, “Electronic Engineering Specialist”, pełen etat, Infomat Systemy Komputerowe.
- Wdrożenia:
  - Stanowisko testujące, kalibrujące i inicjalizujące dla MOBI DX C
  - Element linii produkcyjnej sensorów SensDx - Automat nanoszący biomateriał
  - Spektroskop impedancyjny do detekcji wirusa grypy - Czytnik FluSensor
  - Automat do impedancyjnej kontroli jakości biosensorów

## 5. Uwagi krytyczne

W pracy nie dostrzeżono błędów merytorycznych związanych z tematyką rozprawy. Daje się jednak zauważyć brak korekty językowej, na co wskazuje znaczna liczba błędów gramatycznych (11), stylistycznych (5) oraz ortograficznych (4). Na rys.3.10 brak oznaczeń a), b), rys. 3.4 jest praktycznie nieczytelny, podobnie rys. 5.15a.

Wymieniony jest udział doktoranta w 4 projektach badawczych ale brak informacji w jakim charakterze brał udział (np. kierownik, główny wykonawca, wykonawca).

Brak jest przykładu własnego wydruku z wykorzystaniem urządzenia badanego w pracy.

## 6. Ocena końcowa

Wymienione uwagi krytyczne nie wpływają na jakość rozprawy doktorskiej, którą oceniam wysoko. Nie zauważono błędów merytorycznych, które wymagałyby przedyskutowania.

Doktorant zbudował instalację do wytwarzania materiałów aktywowanych chemicznie do zastosowań w technikach addytywnych takich jak druk 3D metodą FDM. Zaprojektowano, zbudowano i zoptymalizowano aparaturę pomiarową do charakteryzacji materiałów aktywowanych chemicznie w formie filamentu do użycia podczas procesu wytwarzania filamentu jak i po jego zakończeniu. Opracowano, złożono i uruchomiono autorskie układy

elektroniczne odpowiadające za działanie poszczególnych modułów pomiarowych. Zbadano własności materiałów w formie filamentu i porównano wyniki z metodami referencyjnymi. Praktycznie wykorzystano powstałą instalację przy wytwarzaniu materiałów aktywowanych chemicznie do zastosowań w technikach addytywnych w formie filamentu dla drukarek 3D typu FDM.

Reasumując stwierdzam, że sformułowany przez doktoranta cel pracy został osiągnięty i recenzowana rozprawa doktorska **w pełni spełnia wymagania** wynikające z Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce i wnioskuję zatem o dopuszczenie **mgr inż. Jakuba Aniulisa** do publicznej obrony.



Prof. dr hab. Tadeusz Pisarkiewicz