



Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki
Katedra Technologii Materiałowych
Dr hab. inż. Agnieszka Kochmańska, Profesor Uczelni

Szczecin, dn. 03.01.2025 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Jarosława Kalabisa
pt.: „Badania nad opracowaniem technologii wytwarzania multimetalowych drutów
o strukturze multiwłóknistej do zastosowań w spawalnictwie i procesach
przyrostowych”

Podstawą wydania opinii o rozprawie doktorskiej Pana mgr inż. Jarosława Kalabisa jest pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej, Pana Profesora dr hab. inż. Adama Grajcara, z dnia 22 października 2024 roku (RDIMa.512.17.2024).

1. Charakterystyka pracy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Jarosława Kalabisa pt.: „Badania nad opracowaniem technologii wytwarzania multimetalowych drutów o strukturze multiwłóknistej do zastosowań w spawalnictwie i procesach przyrostowych” dotyczy badań multimetalowych drutów składających się z miedzi, aluminium oraz niklu wytworzonych technologią opracowaną przez Doktoranta oraz badania struktury i właściwości materiałów napoin wytworzonych z użyciem tychże drutów metodami spawalniczymi i przyrostowymi.

Rozprawa doktorska liczy 156 stron i została napisana w klasycznym układzie, tj. obejmuje część teoretyczną oraz część doświadczalną, zawierającą opis badań własnych oraz wyniki badań.

W pierwszej części opisującej stan wiedzy, Autor we wstępie wprowadził w tematykę druku 3D, podkreślając jego znaczenie oraz potencjał w różnych

obszarach zastosowań. Następnie omówił znaczenie i rozwój nowych materiałów przeznaczonych do druku 3D, prezentując aktualne trendy oraz właściwości i zastosowania tych materiałów.

W kolejnej części Doktorant przedstawił różne technologie druku 3D. W osobnych rozdziałach Doktorant opisał metodę Material Extrusion (MEX) polegającą na wyłaczaniu materiału przez dyszę z wykorzystaniem filamentu, pasty i granulatu; polimeryzację (Vat Photopolymerization – VPP) jako proces selektywnego utwardzania ciekłego fotopolimeru za pomocą światła ultrafioletowego; kolejno stapianie w złożu proszkowym (Powder Bed Fusion – PBF) wykorzystujące laser do selektywnego topnienia proszków; natryskiwanie materiału (Material Jetting – MJT) polegające na aplikacji cieczy w formie kropli. Opisane zostały również metoda Binder Jetting (BJT), w której złoża proszku łączone są za pomocą spoiwa; metoda Directed Energy Deposition (DED) polegająca na bezpośrednim aplikowaniu materiału na powierzchnię, gdzie jako źródło energii wykorzystywana jest wiązka elektronów lub laser oraz laminowanie arkuszy (Sheet Lamination – SHL) jako technika nakładania i łączenia cienkowarstwowych arkuszy materiału.

W końcowym rozdziale części teoretycznej rozprawy doktorskiej mgr inż. Jarosław Kalabis, analizując postępy technologiczne oraz przyszłe kierunki rozwoju druku 3D, szerzej komentuje rozwój metody Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM). W rozdziale tym Doktorant omówił zastosowanie tej techniki (WAAM) do wytwarzania różnorodnych elementów konstrukcyjnych, takich jak części silników, fragmenty ramion koparek czy elementy mostów. Wskazał, że technika wytwarzania WAAM wyróżnia się szybkością produkcji i elastycznością, co czyni ją odpowiednią do zastosowań seryjnych, zwłaszcza w kontekście rosnącej złożoności produktów. Doktorant pokazuje również obszar zastosowania technologii przyrostowych w przemyśle wojskowym, medycznym, lotniczym i motoryzacyjnym oraz w branży energetycznej. Doktorant podkreślił, że w miarę rozwoju technologie przyrostowe stają się coraz bardziej powszechne w produkcji, co z kolei obiecuje zmiany w różnych sektorach gospodarki.

Na początku drugiej części rozprawy związanej z wynikami badań Autor stawia tezę i przedstawia cel pracy. Na wstępie stwierdza, że istnieją zasadnicze różnice w produkcji i właściwościach drutów proszkowych i multiwłóknistych w kontekście zastosowań, zarówno w spawalnictwie, jak i w opisanym wcześniej metodzie Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM). Doktorant oczekuje, że druty multiwłókniste będą wykazywały wyższą wydajność procesu spawania, szybsze stapianie oraz znacznie łatwiejszą kontrolę nad parametrami spawania, co zredukuje czas potrzebny na przetwarzanie materiałów i wpłynie na zwiększanie efektywności produkcji.

Dodatkowo, poprzez optymalizowanie składu chemicznego, Doktorant zamierza uzyskać określone właściwości przewyższające te dostępne w obecnych rozwiązaniach komercyjnych. Mgr inż. Jarosław Kalabis podkreśla, że kluczowym aspektem zastosowanej przez niego technologii wytwarzania drutów jest „zapewnienie jednorodności materiału oraz jego izotropowość mechaniczna”. W związku z tym teza postawiona przez Autora brzmi: „Zastosowanie multiwłóknistych drutów spawalniczych CuAl i CuAlNi do łukowego napawania przyrostowego 3D przyczyni się do poprawy właściwości mechanicznych i technologicznych modeli (wyrobów) poprzez zwiększenie stabilności jarzenia łuku elektrycznego, co skutkuje ograniczeniem wad i niezgodności napoin zwiększając ich jakość.” Autor stawia sobie za cel opracowanie technologii wytwarzania nowego typu materiału dodatkowego do spawania w postaci multiwłóknistego drutu spawalniczego.

Doktorant założył realizację celu poprzez: opanowanie technologii produkcji tego typu drutów i wyznaczenie właściwości napoin wykonanych metodami przyrostowymi 3D z użyciem wytworzonych drutów jako nie gorszych od drutów litych lub proszkowych stosowanych obecnie.

W części eksperymentalnej w pierwszej kolejności Autor opisał materiały wykorzystane do badań o oznaczeniach: CuAl1, CuAl3, CuAl8, CuAl12, CuAl10Ni10, i materiał komercyjny, oznaczony jako CuAl8 MigWeld oraz opisał technologię wytwarzania drutów. Opisana została również metodyka badań: badania składu chemicznego metodą elektrogravimetryczną, wytwarzanie napawanych wielowarstwowo ścieżek z wykorzystaniem metody TIG oraz metody CMT (Cold Metal Transfer), preparatyka metalograficzna, sposób obrazowania z wykorzystaniem mikroskopii optycznej oraz elektronicznej mikroskopii skaningowej z dodatkową mikroanalizą rentgenowską, badania twardości, badania wytrzymałościowe, tribologiczne, testy korozyjne w mgłę solnej oraz badania składu fazowego XRD. Autor w tej części przedstawia również plan badań w postaci grafu.

W rozdziale 7 Doktorant przedstawia sposób wytwarzania drutów multiwłóknistych. Proces opracowany przez Autora polegał na przygotowaniu drutów aluminiowych i niklowych oraz ich kilkukrotnym pakietowaniu w rurach miedzianych i przeciąganiu przygotowanych pakietów do średnicy 2,15 mm lub 1 mm. Różna średnica docelowa wynikała z wykorzystania drutów do różnych technik (TIG oraz WAAM), a różnice w składzie chemicznych uzyskano dzięki różnym sposobom pakietowania. W rozdziale 8 Autor przedstawił wyniki badania składu chemicznego metodą elektrogravimetryczną. W rozdziale 9 opisano testy spawalnicze metodą TIG, wykonując napoiny przy różnych parametrach spawania.

W rozdziale 10 Autor scharakteryzował testy druku 3D WAAM, wykonując napoiny, jak również stosując różne parametry procesu. W kolejnych rozdziałach opisane zostały struktura i właściwości wykonanych napoin. Rozdziały kolejno 11 i 12 poświęcone zostały wynikom badań mikrostrukturalnych na mikroskopie optycznym oraz skaningowym elektronowym. Dodatkowo oprócz obrazowania materiałów na SEM-ie przedstawiono wyniki mikroanalizy rentgenowskiej EDS punktowe oraz rozmieszczenia pierwiastków na przekroju.

W rozdziale 13 przedstawione zostały wyniki pomiarów twardości HV10 dla uzyskanych napoin, które pozwoliły na ocenę zmian twardości w zależności od miejsca pomiarowego. Pomiarów wykonano w trzech obszarach: górnej części napoiny (lica), w strefie środkowej oraz w dolnej części (grani). Rozdział 14 przedstawia wyniki badań wytrzymałościowych, otrzymane na podstawie badania wytrzymałości na ściskanie: umowną granicę plastyczności, procentowe skrócenie próbki oraz naprężenie ściskające odpowiadające początkowym deformacjom trwałym. Kolejny rozdział prezentuje wyniki badań tribologicznych metodą pin-on-disc. Przedstawiono tu wyniki pomiarów zmiany masy przeciwpróbki i próbki po teście, średnie współczynniki tarcia oraz obrazy śladów zużycia po teście. W rozdziale 16 zaprezentowane zostały wyniki badań korozyjnych po teście w obojętnej mgie solnej. Autor przedstawił wyniki w postaci zmian masy przed i po teście korozyjnym. Ostatni rozdział opisujący uzyskane wyniki dotyczy badań składu fazowego określonego za pomocą dyfrakcji rentgenowskiej XRD. Tu Autor przedstawił wyniki badań z materiałów napoin z obszaru lica, obszaru środkowego oraz obszaru grani, w celu ewentualnego wykazania różnic w składzie fazowym na przekroju uzyskanej napoiny.

Rozdział 18 skupia się na dyskusji uzyskanych wyników. W końcowej części pracy zaprezentowano kluczowe wnioski wynikające z przeprowadzonych badań.

2. Ocena pracy

Rozprawa doktorska mgr inż. Jarosława Kalabisa została napisana w układzie klasycznym: zawiera wstęp teoretyczny, tezę i cel pracy oraz wyniki badań, dyskusję wyników oraz wnioski. Tytuł przedstawionej do recenzji pracy został zdefiniowany poprawnie i odpowiada wynikom badań zamieszczonym w pracy. Rozprawa napisana jest językiem zrozumiałym i poprawnym. Ilustracje i rysunki zamieszczone w pracy są w większości czytelne i dobrej jakości. Opisy rysunków i tabel są w większości właściwe. W spisie literatury zamieszczono 103 pozycje. Cytowana literatura jest adekwatna do opisywanych treści.

We wprowadzeniu Autor uzasadnia celowość podjętych badań nad opracowaniem wysokojakościowego drutu przeznaczonego głównie do zastosowań materiałowych w technologii druku 3D metodą spawania łukowego CMT (Cold Metal Transfer) ale również do zastosowań spawalniczych. Według mgr inż. Jarosława Kalabisa opracowane multimetalowe druty staną się istotnym uzupełnieniem grupy materiałów wsadowych stosowanych w technologiach przyrostowych. Dodatkowo Autor podkreśla, że obszarem zyskującym na znaczeniu w technologiach przyrostowych jest druk z drutów litych i proszkowych bądź ich kombinacji. Autor uzasadnił celowość podjętych badań oraz ich znaczenie.

Analiza treści rozdziałów w części literaturowej wskazuje, że Autor posiada ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie inżynieria materiałowa oraz, że obecny stan wiedzy w zakresie dotyczącym recenzowanej pracy, głównie technologii przyrostowych, został wyczerpująco opisany. Zabrakło w części teoretycznej omówienia stopów miedzi z aluminium oraz niklem, które to Autor opisuje w części badawczej.

Do największych osiągnięć pracy, które należy podkreślić należą: opracowanie technologii wytwarzania multiwłóknistych drutów oraz wytworzenie napoin z wykorzystaniem otrzymanych drutów metodą TIG oraz WAAM.

Rozprawa doktorska mgr inż. Jarosława Kalabisa zawiera wiele badań wykonanych różnymi technikami. Zarówno wykonanie i analiza przeprowadzonych badań wymagała od Doktoranta szerokiej wiedzy w tym zakresie.

Niektóre metody badawcze zostały opisane przez Doktoranta szczegółowo, inne niestety bardziej pobieżnie. W opisie metodyki badań oraz opisie poszczególnych technik badawczych zabrakło poniższych, istotnych informacji, które należałoby uzupełnić:

1. W opisie metody elektrogravimetrycznej nie podano: sposobu pobrania próbek do badań i z jakiego obszaru zostały pobrane, ilości pobranych próbek, wielkości próbek, odczynników zastosowanych podczas badania oraz parametrach prądowych.
2. W opisie metody TIG nie podano prędkości spawania i prędkości podawania drutu.
3. W opisie badań mikroskopii optycznej nie podano, czy zastosowano technikę pola jasnego, ciemnego, czy inną.
4. W opisie mikroskopii elektronowej skaningowej nie podano zastosowanego napięcia przyspieszającego, a w opisie mikroanalizy rentgenowskiej EDS nie podano zastosowanego napięcia przyspieszającego, odległości roboczej wymaganej i zastosowanej oraz czasu akwizycji.

5. W opisie metody pin-on-disc nie podano wielkości zastosowanej do testów przeciwpróbki.

6. W opisie metody NSS nie podano wielkości próbek użytych do testu.

7. W opisie metody XRD nie podano zastosowanego napięcia i prądu, kroku i czasu zliczania na krok.

Niestety Autor nie uniknął również błędów edytorskich oraz niewłaściwego zapisu wyników:

1. W kilkunastu miejscach na końcu wierszy znajdują się tzw. wiszące litery, czyli jedno lub dwuliterowe słowa, co jest uważane za błąd składu. Powinny być one przeniesione na początek kolejnego wiersza.

2. W wykazie skrótów i oznaczeń nie znalazł się skrót WAAM, natomiast w tekście rozprawy jest on wielokrotnie przywoływany łącznie z rozwinięciem.

3. Na stronie 16 znajduje się powtórzenie siedmiu linijek tekstu.

4. W podpisie rysunku 9 na str. 19 znajduje się niewłaściwy odnośnik literaturowy.

5. Na rysunku 13 (str. 36) i 14 (str. 42) nie zamieszczono jednostki.

6. Pod rysunkiem 61 wpisano niewłaściwy podpis.

7. W tabeli 5 na str. 114 podano wyniki wartości twardości, średniej twardości i odchylenia standardowego z różną dokładnością.

8. Podobnie w tabeli 6 na str. 117, 118 i 119 w zapisie wyników wytrzymałości nie ma żadnej systematyczności, raz dokładność jest podana do jednego miejsca po przecinku, innym razem do dwóch miejsc.

9. W tabeli 10 na stronie 125 podano wyniki wartości współczynnika tarcia i odchylenia standardowego z dokładnością do 4 miejsc po przecinku. Jaka jest niepewność pomiaru, skoro wynik podany jest z tak dużą dokładnością?

10. Tabela 12 ze str. 140 jest tożsama z tabelą 1 ze str. 58, podobnie tabela 13 ze str. 141 jest tożsama z tabelą 5 ze str. 114. Nie ma potrzeby zamieszczania identycznych tabel, wystarczy podać w tekście odnośnik do właściwej tabeli znajdującej się wcześniej w tekście.

Analiza treści rozprawy wykazała również pewne niekonsekwencje i niedociągnięcia w redakcji rozprawy, co pokazują następujące uwagi:

1. W pracy znajduje się wiele powtórzeń zarówno w części literaturowej (np. na stronach 37 i 38 dalej na str. 40 i 43), jak i w części badawczej. Autor przedstawia metodę badawczą (np. twardość) w rozdziale 6. *Materiał i metodyka badań*, potem powtarza podobne stwierdzenie w opisie wyników badań i kolejno we wnioskach.

2. Autor stosuje niejednoznaczne opisy, co w tekstach naukowych inżynierskich nie powinno mieć miejsca.

3. Autor nadużywa słowa „kluczowy”. Słowo to jest użyte ponad pięćdziesiąt razy, najczęściej jako kluczowe aspekty czy elementy w przemyśle, zadania, etapy procesu, obszary, komponenty, cechy materiałowe, czynniki, wyzwania, przykłady innowacyjności, procedury, parametry, znaczenie, itd. Wielokrotne powtarzanie tego słowa sprawia, że traci ono swój sens i wydziwiał i zmienia się semantyka przedstawianych treści.

4. W streszczeniu Autor napisał, że „Przedmiotem badań były głównie materiały na bazie miedzi, zawierające w swoim składzie powyżej 10% masowych aluminium”, tymczasem analiza tabeli 1, zawierającej wyniki składu chemicznego, pokazuje, że tylko jeden uzyskany drut ma skład powyżej 10% Al.

5. Na str. 60, Autor napisał: „optymalną biegunowością prądu jest prąd zmienny (AC), który umożliwia pełną kontrolę nad procesem spawania”. Dlaczego, w związku z tym, tylko dwa procesy były przeprowadzone przy zastosowaniu prądu zmiennego?

6. W tabeli 11 przedstawione zostały wyniki kontroli masy próbek po próbie korozyjnej NSS zgodnie z normą PN-EN ISO 9227:2017-06. Wyniki zostały podane jako zmiana masy, a według normy powinny być podane jako zmiana masy na jednostkę powierzchni. Wyniki tak podane przez Autora nie są miarodajne, tym bardziej, że z tabeli wynika, że masa początkowa próbek jest zróżnicowana, co wskazuje na ich różną wielkość, a więc pole powierzchni próbek również było różne.

7. W rozdziale 17. *Analiza fazowa XRD* na dyfrakcjach zidentyfikowano fazę $AlCu_3$, natomiast w tekście w opisie wyników podano, że została zidentyfikowana faza $CuAl_3$.

Powyższe uwagi mają zwrócić uwagę Doktoranta na większą precyzję w opisie procedury badawczej oraz stosowanej nomenklatury w swoich kolejnych pracach.

Chciałabym prosić Autora o wyjaśnienie i omówienie poniższych kwestii:

1. W rozdziale 5. *Teza, cel i zakres pracy* Autor stwierdza: „Kluczowym aspektem tej technologii jest zapewnienie jednorodności materiału oraz jego izotropowości mechanicznej. Dzięki równomiernemu rozkładowi składników w budowie multiwłóknistej, druty będą wykazywać stabilne właściwości niezależnie od kierunku obciążenia”. Proszę o wyjaśnienie, które z przeprowadzonych badań potwierdziły stwierdzenie, że wytworzone druty wykazują stabilne właściwości niezależnie od kierunku obciążenia. Proszę również doprecyzować, czy podobne stwierdzenia pojawiające się w pracy dotyczą drutów czy napoin wykonanych z użyciem tych drutów.

2. Również w rozdziale 5. *Teza, cel i zakres pracy* Autor stwierdza: „Dodatkowo, optymalizacja liniowej sprężystości w określonym zakresie wytrzymałości pozwoli na zastosowanie tych drutów w bardziej wymagających warunkach operacyjnych, co zwiększy ich użyteczność w różnych sektorach przemysłu”. Proszę o doprecyzowanie w jaki sposób Autor zoptymalizował liniową sprężystość w określonym zakresie wytrzymałości.

3. Podczas gdy zdjęcia mikrostruktur uzyskanych dzięki mikroskopii optycznej i elektronowej skaningowej zajmują sporą część pracy, zabrakło analizy tych zdjęć. Na zdjęciach materiałów napoin CuAl widoczne są obszary charakterystyczne dla mikrostruktury brązów aluminiowych jednofazowych α , dwufazowych (z mieszaniną eutektoidalną $\alpha+\gamma_2$) czy z iglastą mikrostrukturą powstałą na skutek szybkiego odprowadzania ciepła – fazą martenzytyczną β' . Autor nie wskazał i nie opisał w żaden sposób uzyskanych wyników, a mają one bezpośredni związek z wynikami twardości i wynikami badań wytrzymałościowych. Proszę o odniesienie się do tego na obronie.

4. W rozdziale 12. *Badania mikroskopowe – skaningowa mikroskopia elektronowa* Autor podaje wyniki mikroanalizy EDS w punkcie dla napoin uzyskanych z użyciem drutu CuAl12 metodą TIG, które wynoszą dla aluminium od około 9 do 17% mas., natomiast dla materiału napoin wytworzonych metodą WAAM zawartość aluminium wynosi od około 5% mas. Proszę wyjaśnić skąd taki spadek zawartości aluminium. Podobnie sytuacja wygląda z zastosowaniem drutu CuAl10Ni10 – przy użyciu metody WAAM w materiale zanalizowano dużo mniejsze zawartości aluminium oraz niklu niż w napoinach wytworzonych metodą TIG. Zmiana składu chemicznego bezpośrednio wpływa na uzyskaną strukturę, a ta na właściwości napoin.

5. W rozdziale 17. *Analiza fazowa XRD* Autor identyfikuje skład fazowy dwóch napoin wytworzonych metodą WAAM z użyciem drutu CuAl12 oraz CuAl10Ni10. We wszystkich przypadkach stwierdzono obecność grafitu. Proszę o podanie informacji, skąd wziął się grafit w materiale. Dodatkowo na zdjęciach mikroskopowych nie jest on nigdzie widoczny, ani też nie został zidentyfikowany w składzie chemicznym. Proszę również o komentarz, jak wyniki analizy fazowej korespondują z mikrostrukturą napoin przedstawioną w pracy.

6. Na jakiej podstawie wybrano do testów pin-on-disc siłę docisku 5 oraz 10 N? Czy dobrano obciążenia na podstawie obliczeń maksymalnych naprężeń kontaktowych i czy nie została przekroczona granica plastyczności badanego materiału? W związku z tym, że nie została podana średnica przeciwpróbki, trudno to stwierdzić.

7. W rozdziale 14. *Badanie wytrzymałości na ściskanie* Autor nie pokazuje uzyskanych wykresów naprężenie-odkształcenie. Proszę o przedstawienie przykładowego wykresu dla próbek napoin wytworzonych obydwoma technikami TIG i WAAM z użyciem drutów CuAl12 i CuAl10Ni10. Wyniki dla tych materiałów budzą wątpliwości, tj. dla metody TIG granica plastyczności jest bardzo wysoka, a dla metody WAAM – podczas gdy granica plastyczności jest bardzo niska, wytrzymałość na ściskanie jest bardzo wysoka.

Wniosek końcowy

Stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta ubiegającego się o nadanie stopnia doktora w dyscyplinie inżynieria materiałowa, rozprawa doktorska wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta oraz stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i wnosi elementy nowości do dyscypliny inżynieria materiałowa.

W mojej opinii przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Jarosława Kalabisa pt. „Badania nad opracowaniem technologii wytwarzania multimetalowych drutów o strukturze multiwłóknistej do zastosowań w spawalnictwie i procesach przyrostowych” spełnia ustawowe wymogi stawiane pracom doktorskim. W związku z powyższym wnoszę do Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej o dalsze procedowanie i o dopuszczenie mgr inż. Jarosława Kalabisa do publicznej obrony.



