

prof. dr hab. inż. Grzegorz Golański

Częstochowa 16.01.2025

Katedra Inżynierii Materiałowej

Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów

Politechnika Częstochowska

**RECENZJA****pracy doktorskiej mgr inż. Jarosława Kalabis**

*pt. „Badania nad opracowaniem technologii wytwarzania  
multimetalowych drutów o strukturze mulitiwłóknistej do zastosowań  
w spawalnictwie i procesach przyrostowych”*

**promotor rozprawy: dr hab. inż. Santina Topolska, prof. PŚ****opiekun pomocniczy: mgr inż. Witold Malec****wykonana na zlecenie Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa  
Politechniki Śląskiej****Podstawa formalna recenzji**

Recenzja pracy doktorskiej Pana mgr inż. Jarosława Kalabisa pt. „*Badania nad opracowaniem technologii wytwarzania multimetalowych drutów o strukturze mulitiwłóknistej do zastosowań w spawalnictwie i procesach przyrostowych*” została opracowana na zlecenie Rady Dyscypliny Inżynierii Materiałowa Politechniki Śląskiej (pismo nr RDIMa/135/51/2024 z dnia 22.10.2024).

## Ogólna charakterystyka rozprawy

Opiniowana praca doktorska została opracowana pod opieką naukową promotora Pani dr hab. inż. Santiny Topolskiej, prof. Politechniki Śląskiej oraz opiekuna pomocniczego Pana mgr inż. Witolda Malec. Rozprawa została napisana w języku polskim i obejmuje 156 stron tekstu. Dysertacja podzielona była zasadniczo na dwa rozdziały: część teoretyczną i część eksperymentalną. Część teoretyczna, obejmująca rozdziały od 1 do 4, licząca 36 stron poprzedzona była streszczeniem w języku polskim i angielskim oraz wykazem ważniejszych oznaczeń i skrótów użytych w pracy. Część badawcza zawierająca 93 strony (rozdziały od 6 do 18), poprzedzona była rozdziałem 5 – *Teza, cel i zakres pracy*, a kończyła się wnioskami (rozdział 19). Recenzowana praca zawiera 99 rysunki, przedstawiających w przeważającej liczbie bogato udokumentowane wyniki własnych badań, z których część była wielokrotnie złożonymi ilustracjami oraz 13 tabel, w których zestawiono uzyskane wyniki badań eksperymentalnych. Praca kończy się spisem literatury obejmującym 103 pozycje.

## Ocena rozprawy i uwagi ogólne

Technologie przyrostowe, ze szczególnym uwzględnieniem druku 3D, pozwalają na wytwarzanie trójwymiarowego elementu poprzez kolejne stopniowe nakładanie poszczególnych warstw materiału o precyzyjnie określonej grubości. W przeciwieństwie do konwencjonalnych metod ubytkowych (np. obróbka skrawaniem) technologie przyrostowe umożliwią zarówno jednostkową, jak i seryjną (mało lub średnio) produkcję złożonych geometrycznie detali, które są trudne lub niemożliwe do wykonania przy użyciu tradycyjnych metod wytwórczych. Optymalizacja parametrów procesów przyrostowych umożliwia ponadto uzyskanie finalnych detali o właściwościach użytkowych lepszych w porównaniu do tych elementów wytworzonych tradycyjnymi technologiami. Dodatkowo technologie te pozwalają na rozsądne zarządzanie potencjalnym materiałem konstrukcyjnym, ograniczając jego jednostkowe zużycie,

poprzez ograniczenie powstawania odpadów. Powyższe czynniki są uzasadnione nie tylko z ekonomicznego punktu widzenia, ale również z coraz silniej akcentowanych wymagań dotyczących ochrony środowiska i tzw. produkcji proekologicznej. Technologie przyrostowe, w tym druk 3D z wykorzystaniem jako materiału wsadowego metali lub ich stopów są postrzegane jako technologiczne metody wytwarzania o wysokim potencjale aplikacyjnym w różnych gałęziach przemysłu m.in. w lotnictwie, motoryzacji, medycynie, czy też przemyśle zbrojeniowy. Technologie te zapewniają wymagane dla tych sektorów gospodarki elementy cechujące się: niezawodnością, wysoką precyzją, lekkością konstrukcji, czy też możliwością personalizacji produkcji. Ograniczenia związane z dostępnością odpowiednich materiałów wsadowych spełniających wymagania przemysłu w zakresie technologii druku 3D z drutu, stymulują intensywne badania w tym temacie. Rozwinięcie potencjału technologii przyrostowej, w tym druku 3D poprzez opracowanie nowych materiałów wsadowych o oczekiwanym składzie chemicznym i właściwościach użytkowych stały się kluczowym zadaniem dla wielu zespołów naukowo-badawczym nie tylko w Europie, ale również na świecie. Wychodząc naprzeciw oczekiwaniom przemysłu, w ramach rozprawy doktorskiej zostały przeprowadzone badania mające na celu opracowanie i wytworzenie wysokojakościowych, mulimetalowych drutów na bazie stopów miedzi o multiwłóknistej strukturze przeznaczonych do zastosowań materiałowych w technologii spawania (metoda TIG) oraz druku 3D, wykorzystującej metodę spawania łukowego CMT (Cold Metal Transfer). Stąd tematyka zaprezentowana w rozprawie doktorskiej Pana mgr inż. Jarosława Kalbisa doskonale wpisuje się w poszukiwania przemysłu nowych materiałów wsadowych o wymaganych składzie chemicznym i określonych właściwościach użytkowych. W mojej ocenie tematyka zawarta w rozprawie doktorskiej oraz przedstawione w pracy wyniki badań mają głównie znaczenie użytkowe, ale również są istotne z poznawczego punktu widzenia. Podjęcie przez Pana mgr inż. Jarosława Kalbisa tematu pracy związanego z opracowaniem technologii wytwarzania drutów multimetalowych oraz oceną możliwości zastosowania tych materiałów w spawalnictwie

i procesach przyrostowych należy uznać za uzasadnione, a przeprowadzone w ramach rozprawy badania mają istotny walor praktyczny.

Część literaturowa dysertacji została opracowana przez Pana mgr inż. Jarosława Kalabisa z wykorzystaniem 101 pozycji literaturowych z 103 przywołanych w bibliografii. Pozycje te obejmowały zarówno artykuły opublikowane w renomowanych czasopismach krajowych, jak i zagranicznych, książki, materiały konferencyjne oraz strony www. Większość z przywołanych pozycji literaturowych (ponad 80 pozycji) została opublikowanych w ostatnich 10 latach, co świadczy o jej aktualności. W tej części pracy doktorskiej Doktorant, posiłkując się 14 ilustracjami, w sposób zadawalający przedstawił zakres wiedzy wprowadzający w przedmiotową problematykę badawczą. Jednakże w ocenie Recenzenta w części teoretycznej pracy brak jest przeglądowych informacji na temat wpływu druku 3D na mikrostrukturę i właściwości użytkowe wytworzonych tą metodą detali. Ponadto w tej części rozprawy, Doktorant miejscami stosuje zabieg cytowania znacznej liczby prac, np. strona 33, przywołano pozycje od 53 do 99, strona 40, pozycje od 62 do 78, czy też strona 41, przywołano pozycje od 81 do 90, co w ocenie Recenzenta jest czynnością prowadzącą do niepotrzebnego mnożenia przywoływanej literatury. Zastrzeżenie budzi również sam spis przywołanej literatury, który został przygotowany niezgodnie z powszechnie przyjętymi wymogami.

Na podstawie przeglądu literaturowy oraz wstępnych badań własnych Doktorant sformułował tezę pracy o następującym brzmieniu: „*Zastosowanie multiwłóknistych drutów spawalniczych CuAl i CuAlNi do lukowego napawania przyrostowego 3D przyczyni się do poprawy właściwości mechanicznych i technologicznych modeli (wyrobów) poprzez zwiększenie stabilności jarzenia luku elektrycznego, co skutkuje ograniczeniem wad i niezgodności napoin zwiększając ich jakość*”. Pewne zastrzeżenia w treści przedstawionej tezy pracy budzą w ocenie Recenzenta niefortunnie zastosowane pojęcia: *wady i niezgodności spawalniczej*. Według normy PN – EN ISO 6520-1<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> PN EN ISO 6520-1 Spawanie i procesy pokrewne – Klasyfikacja geometrycznych niezgodności spawalniczych w metalach – Część 1. Spawanie

*niezgodność* to nieciągłość w spoinie lub odchylenie od zamierzonej geometrii. Z kolei *wada* to niedopuszczalna niezgodność spawalnicza. Z prawnego punktu widzenia wyrób z wadą nie może być zbyty oraz dopuszczony do naprawy, czy też użytkowania. Zastosowanie pojęcia wada w tezie pracy sugeruje, że otrzymany wyrób jest niepełnowartościowy i nie podlega żadnej klasyfikacji poziomu jakości, co jest oczywistą nieprawdą.

Oprócz tezy Doktorant przedstawił dwa główne cele rozprawy, którymi były: 1. opracowanie technologii wytwarzania nowego typu materiału dodatkowego do spawania w postaci multiwłóknistego drutu spawalniczego oraz 2. udowodnienie dobrych właściwości mechanicznych i technologicznych napoin wykonanych tymi drutami.

W celu osiągnięcia założonej tezy oraz celów pracy, co zasługuje na podkreślenie, Doktorant zrealizował szeroki wachlarz badań obejmujący m.in.: makro- i mikroskopowe obserwacje za pomocą mikroskopii świetlnej i skaningowej mikroskopii elektronowej, analizę i mikroanalizę składu chemicznego wytworzonych próbek, analizę składu fazowego metodą dyfrakcji rentgenowskiej oraz badania właściwości mechanicznych – statyczna próba ściskania, badania trybologiczne, pomiar twardości oraz badania korozyjne w atmosferze mgły solnej. Eksperyment w recenzowanej pracy przeprowadzono na próbkach uzyskanych za pomocą technologii spawalniczej metodą TIG (Tungsten Inert Gas) oraz druku 3D z zastosowaniem technologii WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) wytworzonych z otrzymanych multimetalowych drutów o budowie multiwłóknistej. Badaniu poddano materiały multiwłókniste na bazie miedzi CuAl1CuAl3, CuAl12, CuAl10Ni10 oraz drut komercyjny CuAl8 (dla metody TIG), z kolei dla metody WAAM wytypowano do badań dwa gatunki drutów: CuAl12 oraz CuAl10Ni10. Przyjęty zakres i metodyka eksperymentu w zakresie badań strukturalnych i (mikro)analizy składu chemicznego oraz analizy fazowej nie budzi większych zastrzeżeń. Zastanawiający jest jednak dobór metod badawczych mających określić właściwości mechaniczne uzyskanych próbek. Proszę Doktoranta o komentarz, dlaczego wytypowano takie, a nie inne metody badań właściwości mechanicznych. Wyniki obserwacji (mikro)struktury i badań właściwości mechanicznych oraz testów

korozyjnych uzyskanych próbek Doktorant przedstawił w rozdziale od 11 do 17. Wyniki badań zawarte w tych rozdziałach są bogato ilustrowane za pomocą licznych mikrostruktur, rysunków oraz tabel. Pozwoliło to na uzyskanie szeregu wartościowych wyników z zakresu mikrostruktury oraz właściwości mechanicznych próbek ze stopów miedzi. Szkoda jednak, że w tych rozdziałach Doktorant nie pokusił się o głębszą analizę wpływu spawania oraz druku 3D metodą WAAM na zmiany w mikrostrukturze oraz właściwościach użytkowych tych wytworzonych próbek. Podsumowaniem szerokiego zakresu przeprowadzonych badań metaloznawczych wytworzonych materiałów był rozdział 18 (*Dyskusja wyników*), gdzie Pan mgr inż. Jarosław Kalabis w sposób lapidarny z wykorzystaniem danych zestawionych w tabelach poddał analizie uzyskane wyniki badań. Na podstawie zrealizowanego szerokiego programu badań i uzyskanych wyników oraz ich analizy Doktorant w rozdziale 19 (*Wnioski*) sformułował dziesięć wniosków. Konkluzje zawarte w punktach 1-7 wynikają bezpośrednio z uzyskanych wyników badań. Z kolei wnioski 8-10 są swoistym podsumowaniem zrealizowanego eksperymentu oraz zawierają wskazówki w temacie prawdopodobnego zastosowania i potencjału rozwojowego multiwłóknistych drutów spawalniczych.

Oceniając od strony merytorycznej część eksperymentalną recenzowanej pracy doktorskiej Pana mgr inż. Jarosława Kalabisa należy stwierdzić, że zarówno zaplanowanie eksperymentu, dobór i zastosowanie technik badawczych oraz opracowanie uzyskanych wyników były wykonane poprawnie i jako całość nie budzą większych zastrzeżeń. Na podkreślenie zasługuje strona edycyjna pracy, która jest na wysokim poziomie. Pewien niedosyt budzi jednak przeprowadzona analiza uzyskanych wyników badań, która miejscami była zbyt ogólnikowa i bardziej przypominała sprawozdanie z przeprowadzonego eksperymentu, niż krytyczną dyskusję naukową. Praca napisana jest poprawnym językiem, a zastosowana terminologia techniczna poza pewnymi wyjątkami jest właściwa. W treści recenzowanej rozprawy zauważono również pojedyncze niezręczności stylistyczne, tzw. „literówki”, miejscami stosowany był też żargon techniczny (np. spawarka) oraz nazbyt rozbudowane zdania.

### Uwagi dyskusyjne i szczegółowe

W trakcie szczegółowej analizy rozprawy doktorskiej nasuwają się pewne spostrzeżenia natury polemicznej oraz uwagi szczegółowe, które przedstawiam poniżej.

1. Na stronie 39 rozprawy Doktorant pisze o „*przemysle wiatrowym*”. Proszę o wyjaśnienie, co to jest za gałąź gospodarki.
2. Czy Doktorant w sposób bezpośredni określił stabilność jarzenia łuku elektrycznego?
3. Czy przeprowadzono badania technologiczne uzyskanych napoin, jeśli tak to jakie?
4. Proszę o wyjaśnienie, co Doktorant rozumie pod pojęciem niezgodności typu „*niedokładne stopienie materiału*”?
5. Brak opisu mikrostruktur przedstawionych na złożonych rysunkach 21+30 uzyskanych za pomocą mikroskopii świetlnej oraz skaningowej mikroskopii świetlnej – rysunki 31, 34, 37, 40, 43, 46, 49, 52, etc. Proszę o zwięzłe scharakteryzowanie mikrostruktury tych analizowanych materiałów.
6. Czy obserwowano na przekrojach uzyskanych próbek niezgodności spawalnicze? Jeśli tak to jakie kryterium (lub kryteria) spełniały wytworzone próbki.
7. Co zdaniem Doktoranta wnoszą do wiedzy inżynierskiej mapy rozkładów pierwiastków stopowych przedstawione na rysunku: 33, 36, 39, 42, etc.
8. Skąd zdaniem Doktoranta takie znaczące różnice w uzyskanych wynikach twardości pomiędzy próbkami wytworzonymi metodą TIG, a WAAM?
9. Na stronie 116 rozprawy Doktorant pisze „... *co może świadczyć o dobrym połączeniu mikrostruktury w całej objętości...*”. Proszę Doktoranta o komentarz, jak należy rozumieć frazę *dobre połączenie mikrostruktury*.
10. Na stronie 116 Doktorant wskazuje, że niskie wartości twardości próbek wytworzonych metodą WAAM wynikają ze specyficznych warunków tego procesu. Prosiłbym Doktoranta o sprecyzowanie, co rozumie pod pojęciem specyficzne warunki procesu WAAM.

11. Z jakiej części otrzymanego materiału badawczego pobierano próbki do badań statycznej próby ściskania? Z czego zdaniem Doktoranta mogły wynikać różnice w uzyskanych wartościach granicy plastyczności przy ściskaniu oraz wytrzymałości na ściskanie, np. dla próbek AlCu12 czy też CuAl10Ni10 wytworzonych metodą TIG i WAAM?
12. Dlaczego nie obserwuje się korelacji pomiędzy wynikami pomiaru twardości, a wynikami statycznej próby ściskania dla analizowanych materiałów?
13. Dlaczego w przypadku badań trybologicznych zastosowano różne obciążenie i różne prędkości liniowe eksperymentu?
14. W jaki sposób były przygotowywane próbki do badań trybologicznych, skoro niestabilność procesu tarcia według Doktoranta wynikała z nieregularności powierzchni.
15. Proszę Doktoranta o wskazanie na zamieszczonych obrazach powierzchni próbek (rys. 92, strona 126, 127) „...typowej dla tego procesu topografii płaskowyżowej z wzniesieniami o ostrych krawędziach”.
16. Dyfraktogram próbki CuAl12 (rys. 94, rys. 95, strona 134) wytworzonej metodą WAAM wykazał obecność grafitu, co zdaniem Doktoranta wskazuje na występowanie w strukturze tego materiału węglików. Czy można uzyskać od Doktoranta informacje, jakiego typu węgliki można zaobserwować w tym stopie miedzi?
17. Co oznacza często pojawiający się na kartach rozprawy doktorskiej termin „spójność strukturalna”?
18. Na stronie 141 Doktorant wskazuje, że poprzez przeprowadzone badania określono, „precyzyjne właściwości strukturalne”. Proszę o wskazanie tych właściwości przez Doktoranta.
19. We wniosku 1 Doktorant pisze, że „Wytworzone materiały spełniają wymagania stawiane współczesnym materiałom inżynierskim w zakresie wytrzymałości mechanicznej i jednorodności struktury”. Proszę Doktoranta o przybliżenie tych wymagań, dla uzyskanych materiałów.



20. W opracowaniu Autor zastosował miejscami terminologię niezgodną z przyjętym w opisie metaloznawstwie nazewnictwem, np. *wytrącania się w osnowie metalicznej*, jest wydzielenia się faz wtórnych, wydzielenie się węglików, czy też *struktury krystalograficznej*, jest struktura krystaliczna, bądź układ krystalograficzny. Ponadto odporność korozyjną nie zaliczamy do właściwości wytrzymałościowych.

### Wniosek końcowy

Recenzowana praca stanowi oryginalne osiągnięcie naukowe i jest powiązana jest z rzeczywistymi oczekiwaniami i potrzebami środowiska przemysłowego w przedmiotowym zakresie. Przedstawione w pracy doktorskiej wyniki badań mają aspekt użytkowy i potencjalnie aplikacyjny. Autor rozprawy w swojej dysertacji wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną, znajomością różnorodnych metod badań materiałów oraz umiejętnością samodzielnego zaprojektowania i przeprowadzenia eksperymentu. Słabszą stroną pracy był natomiast oszczędny opis i analiza metaloznawcza mikrostruktur oraz właściwości użytkowych wytworzonych materiałów.

**Podsumowując po zapoznaniu się z rozprawą doktorską Pana mgr inż. Jarosława Kalabisa pt: „*Badania nad opracowaniem technologii wytwarzania multimetalowych drutów o strukturze mulitiwłóknistej do zastosowań w spawalnictwie i procesach przyrostowych*”, stwierdzam, że recenzowana praca spełnia wymagania stawiane przez obowiązującą Ustawę z dnia 20 lipca 2018 roku – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późniejszymi zmianami) i wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej o dopuszczenie jej do dalszych etapów postępowania o nadania stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa.**



