



Lublin, dn. 22-12-2024 r.

dr hab. inż. Mirosław Szala, prof. uczelni  
Katedra Inżynierii Materiałowej  
Wydział Mechaniczny  
Politechnika Lubelska  
ul. Nadbystrzycka 36D; 20-618 Lublin

## 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”,  
wykonanej pod opieką promotor, dr hab. inż. Santiny Topolskiej, prof. uczelni  
oraz promotora pomocniczego, mgr. inż. Witolda Maleca.

### Uwaga formalna

Niniejsza recenzja została opracowana na podstawie pisma o sygnaturze RDIMa.512.17.2024 z dnia 22.10.2024 r., przesłanego przez Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej, prof. dra hab. inż. Adama Grajcara.

## 1. Charakterystyka rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska mgr. inż. Jarosława Kalabisa dotyczy opracowania innowacyjnej technologii wytwarzania materiałów spawalniczych. Opiera się ona na pakietowaniu drutów wykonanych z aluminium oraz aluminium i niklu do rury miedzianej oraz ciągnienu celem uzyskania drutów multimetalowych o średnicy dostosowanej do wymagań druku 3D metodą Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM). W pracy pakietowano materiały CuAl1, CuAl3, CuAl8, CuAl12 oraz CuAl10Ni10 uzyskując materiały dodatkowe o strukturze multiwłóknistej, które posłużyły do wykonania próbek napawanych metodami TIG oraz WAAM (CuAl12 i CuAl10Ni10). W ramach realizacji części badawczej pracy, wykonano analizę składu chemicznego, mikrostruktury oraz składu fazowego, pomiary twardości, testy odporności na zużycie ścierne oraz korozyjne w mgle solnej próbek wytworzonych metodami TIG i WAAM z multimetalowych drutów oraz z referencyjnego drutu komercyjnego CuAl8 (napawanie metodą TIG). Bazując na wynikach badań stwierdzono przydatność multimetalowych drutów, wykonanych przy użyciu opracowanej technologii, jako materiały dodatkowe używane w procesach spawalniczych, w tym szczególnie w kontekście przyrostowych technologii wytwarzania, takich jak WAAM.

Rozprawa doktorska mgr. inż. Jarosława Kalabisa przedstawiona została w postaci zwięzłego opracowania na 156 stronach formatu A4. Struktura opracowania nie odbiega od przyjętych standardów

Biuro Dziekana

dla tego typu prac. Zawiera ona spis treści, streszczenie w języku polskim i angielskim, wykaz oznaczeń i skrótów, dziewiętnaście merytorycznych rozdziałów oraz spis literatury. Kilukrotnie Autor rozprawy, podkreśla jej użyteczny charakter bazujący na kooperacji Politechniki Śląskiej oraz Centrum Zaawansowanych Technologii Materiałowych Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytut Metali Nieżelaznych.

Przedłożona do recenzji dysertacja ma typową strukturę dla pracy naukowej. Autor po krótkim wprowadzeniu dokonuje zwięzłego i syntetycznego opisu aktualnego stanu wiedzy dotyczącego następujących zagadnień: znaczenia i rozwoju materiałów stosowanych w technologiach addytywnych, podstawowych technologii związanych z wytwarzaniem przyrostowym oraz omówienia kierunków rozwoju technologii druku 3D. Po części teoretycznej pracy, Doktorant zawarł tezę oraz cel pracy. W rozdziale szóstym Autor opisuje materiały i metodykę badań oraz prezentuje plan badań w formie schematu blokowego. Kolejne rozdziały dysertacji zawierają opis technologii otrzymywania multimetalowych drutów oraz analizę ich składu chemicznego. Część badawcza pracy oparta jest na analizie porównawczej komercyjnego drutu spawalniczego oraz drutów multiwłóknistych wytworzonych przy użyciu opracowanej technologii. W kolejnych rozdziałach Autor opisuje wykonanie próbek do badań napawanych metodą TIG oraz wytworzonych metodą przyrostową WAAM. Próbkę przygotowano z materiałów dodatkowych w formie multimetalowych drutów własnych, wytworzonych w oparciu o opracowaną technologię oraz z referencyjnego komercyjnego drutu spawalniczego. W późniejszych rozdziałach Autor opisuje i analizuje uzyskane wyniki badań własnych. Na podkreślenie zasługuje szeroki zakres zrealizowanych badań. Część badawcza pracy zakończona jest rozdziałem przedstawiającym wnioski.

Bibliografia dysertacji mgr. inż. Jarosława Kalabisa obejmuje 103 pozycje, wśród których można wyróżnić:

- 3 prace, których Doktorant jest współautorem (w każdym przypadku pierwszym);
- 1 zgłoszenie patentowe, dotyczące tematyki rozprawy doktorskiej (Doktorant jest pierwszym autorem zgłoszenia patentowego);
- większość cytowanych artykułów pochodzi z czasopism, w których zagadnienia inżynierii materiałowej są w głównym nurcie tematycznym oraz mają uznaną pozycję w międzynarodowym środowisku naukowym;
- Doktorant odpowiednio wyważył proporcje pomiędzy pracami fundamentalnymi (klasycznymi dla opisywanych zagadnień) a aktualną literaturą (artykuły młodsze niż 5 lat, których jest 19).

## 2. Analiza i ocena rozprawy

Pomimo pewnych drobnych potknięć układ pracy należy uznać za jasny i przejrzysty. Doktorant w sposób wystarczający opanował stosowanie zwrotów i opisów technicznych, a terminologia i pojęcia używane w pracy są używane zasadniczo poprawnie. Tytuł przedstawionej rozprawy „*Badania nad opracowaniem technologii wytwarzania multimetalowych drutów o strukturze multiwłóknistej do zastosowań w spawalnictwie i procesach przyrostowych*” dobrze koresponduje z treścią zawartą w pracy.

Część teoretyczna rozprawy omawia w stopniu wystarczającym stan wiedzy teoretycznej z zakresu tematyki rozprawy doktorskiej, lecz po lekturze tej części rozprawy odczuwalny jest brak syntetycznego podsumowania lub wypunktowania konkluzji wynikających z przeprowadzonego przeglądu danych literaturowych.

Podsumowanie i uzasadnienie celu podjętych badań zaprezentowane zostały w rozdziale „5. Teza, cel i zakres pracy”. Autor uzasadnia w nim innowacyjność opracowanej technologii wytwarzania drutów multiwłóknistych oraz nowość podjętej tematyki badawczej. Teza rozprawy doktorskiej tj.: *„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”* nie została przedstawiona w sposób dostatecznie klarowny, co uniemożliwia jednoznaczne stwierdzenie, czy została udowodniona w ramach zrealizowanego programu badań. W szczególności brak jest precyzyjnych informacji dotyczących:

- poprawy właściwości mechanicznych i technologicznych – nie określono, jakie konkretne właściwości mechaniczne i technologiczne modeli (wyrobów) mają zostać poprawione, jakie kryteria przyjęto do ich oceny oraz w stosunku do jakiego materiału referencyjnego lub technologii ta „poprawa” jest identyfikowana;
- zwiększenia stabilności jarzenia łuku elektrycznego – brakuje szczegółowych informacji na temat metodyki analizy stabilności jarzenia łuku oraz kryteriów, które posłużyły do oceny tej stabilności;
- oceny jakości napoin – nie zostały jasno określone kryteria oceny jakości napoin, w tym sposób, w jaki kwalifikowano zidentyfikowane niezgodności napoin jako wady.

Ze względu na powyższe braki, bardziej uzasadnione wydaje się przyjęcie podejścia opartego na hipotezie badawczej. Hipoteza ta mogłaby zakładać, że opracowane druty multiwłókniste umożliwią elastyczny dobór składu chemicznego, a napoiny wytworzone przy ich użyciu będą cechowały się właściwościami mechanicznymi i technologicznymi co najmniej porównywalnymi z obecnie stosowanymi komercyjnymi drutami litymi lub proszkowymi.

W rozdziale 5 przedstawiono cel pracy tj.: *„Opracowanie technologii wytwarzania nowego typu materiału dodatkowego do spawania w postaci multiwłóknistego drutu spawalniczego”*. Stwierdzam, że cel pracy jest sformułowany w sposób klarowny i poprawny. Praca zawiera informacje na temat opracowanej technologii wytwarzania drutów multiwłóknistych, zweryfikowano pozytywnie możliwość wykonania takich drutów do zastosowań spawalniczych, co znajduje potwierdzenie w wykonaniu przy ich użyciu próbek napawanych metodami TIG oraz wytworzonych addytywnie WAAM. Bezspornie technologia zaproponowana przez mgr. inż. Jarosława Kalabisa w rozprawie doktorskiej stanowi oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej, tj. w produkcji materiałów spawalniczych w postaci drutów multiwłóknistych oraz, jak podaje Autor rozprawy, *„nowopowstałe materiały mogą stać się konkurencyjne w stosunku do dostępnych na rynku komercyjnych rozwiązań”*.

Część badawcza pracy obejmuje szeroki zakres badań, co niewątpliwie stanowi duży atut pracy. Doktorant badał wytworzone napoiny realizując badania metalograficzne, badania składu fazowego, badania składu chemicznego oraz analizował twardość napoin w wybranych mikroobszarach próbek. Napawane próbki poddał testom wytrzymałości na ściskanie, przeprowadził badania tribologiczne oraz badania korozyjne w komorze solnej. Wyniki uzyskane z badań poddał analizie porównawczej. Opis metodyki badań i sposób przeprowadzenia testów oraz dyskusja wyników mają wystarczający poziom potwierdzający umiejętność prowadzenia pracy naukowej przez mgr. inż. Jarosława Kalabisa. Cel, zakres tematyczny i metodyka badawcza wskazane w rozprawie doktorskiej są dopasowane do dyscypliny *inżynieria materiałowa*.

Kolejny rozdział zatytułowany „18. Dyskusja wyników” zawiera syntezę głównych rezultatów wynikających z przeprowadzonych prac badawczych. W rozdziale tym Autor dowodzi potwierdzenia tezy pracy. Wskazuje również na potencjał aplikacyjnych opracowanej technologii wytwarzania multimetalowych drutów spawalniczych. Niestety, z treści rozprawy nie wynika, iż teza rozprawy została udowodniona. Natomiast bezsprzecznie praca doktorska ma aplikacyjny charakter. Ponadto, dyskusja wyników oraz analiza uzyskanych rezultatów badań nie zawierają odniesień do dostępnej literatury. Fakt ten można tłumaczyć aplikacyjnym charakterem pracy oraz trudnościami jakie napotkał Doktorant podczas wyszukiwania danych naukowych opisujących napoiny wytworzone z materiałów multiwłóknistych. Sugeruje to, iż opracowana technologia wytwarzania materiałów dodatkowych w formie drutów multiwłóknistych jest oryginalna i napoiny wytworzone przy jej zastosowaniu nie zostały jeszcze opisane w aktualnej literaturze naukowo-technicznej.

Wnioski przedstawione przez Doktoranta w rozdziale „19. Wnioski” dobrze korespondują z celem pracy pomimo, iż Autor rozprawy nie odnosi się w tej części pracy do obranego w rozdziale piątym celu oraz postawionej tezy. Co więcej, we wnioskach, mgr inż. Jarosław Kalabis podkreśla i dodatkowo potwierdza słuszność przyjętej koncepcji badań nad technologią produkcji materiałów spawalniczych w formie multimetalowych drutów. W tej części pracy podsumowano znaczenie oryginalnego rozwiązania technologicznego z obszaru spawalnictwa. Zaakcentowano, iż napoiny charakteryzują się zadowalającymi właściwościami, co według Autora rozprawy, jest zasługą technologii, przy użyciu której wyprodukowano materiały dodatkowe zastosowane do napawania a technologia otrzymywania drutów multiwłóknistych mogłaby się sprawdzić w przedsiębiorstwach produkujących materiały dodatkowe do spawania. Z drugiej strony, treść wniosków wymienionych w rozdziale 19 nie jest dostatecznie syntetyczna. Zawiera ona dużą ilość uogólnień, a niektóre z dziesięciu wymienionych stwierdzeń nie znajdują swojego odzwierciedlenia w zakresie prowadzonych prac i analizie przeprowadzonych badań własnych. Przykładowo: „9. Znaczenie w rozwoju technologii druku 3D WAAM – wyniki badań dowodzą, że materiały multiwłókniste mogą znacząco poprawić efektywność i jakość procesów związanych z technologią druku 3D WAAM. Zwiększona kontrola nad składem chemicznym oraz właściwościami mechanicznymi napoiny stwarza możliwości dla produkcji wyrobów o wyższych parametrach użytkowych.” – w pracy nie podano kryteriów poprawy efektywności i jakości procesów druku 3D, nie jest również doprecyzowane jakie parametry

użytkowe ma na myśli Autor oraz sformułowanie „zwiększona kontrola” nie jest jasne i wymaga wyjaśnienia. Rozdział pt. „19. Wnioski” rozprawy doktorskiej oprócz potwierdzenia osiągnięcia celu pracy zawiera również informacje dające się klasyfikować jako „podsumowanie” oraz „kierunki dalszych badań” które to należałoby odseparować od wniosków wynikających z analizy badań własnych. Taką sytuację można zapewne usprawiedliwić niewielkim doświadczeniem publikacyjnym, gdzie podczas realizacji doktoratów wdrożeniowych niemal cała uwaga doktoranta skupia się głównie na rozwiązaniu problemu w występującego w danym podmiocie gospodarczym. Niemniej jednak wnioski powinny być podzielone na dwie grupy: wnioski o charakterze poznawczym (naukowym) oraz wnioski o charakterze użytkowym. Z racji tego, że jest to rozprawa doktorska, uwypuklenie wniosków naukowych jest wręcz oczekiwane.

Ostatni rozdział rozprawy doktorskiej zawiera spis literatury użytej do sporządzenia opracowania. Wykaz ten, pomimo iż można wyszczególnić dominujący styl zapisu bibliografii, nie został opracowany w sposób jednorodny i wybrane opisy bibliograficzne wymagają uzupełnienia lub zawierają za dużo danych w stosunku do podstawowego stylu bibliograficznego. Pod względem merytorycznym, bibliografia rozprawy doktorskiej została dobrana w sposób adekwatny do zakresu tematycznego dysertacji.

Analizując powyżej przedstawione aspekty rozprawy doktorskiej stwierdzam, iż mgr inż. Jarosław Kalabis wykazał się dostateczną ogólną wiedzą teoretyczną wymaganą do nadania stopnia doktora w dyscyplinie *inżynieria materiałowa*.

Mimo na ogół stosunkowo poprawnej redakcji dysertacji, Doktorant nie ustrzegł się pewnych uchybień i nieścisłości. Niektóre sformułowania są użyte w rozprawie doktorskiej niezręcznie lub niewłaściwie, przykładowo:

- 1) Autor, w części teoretycznej pracy, skupia się na zaletach technologii addytywnych sugerując uzyskanie gotowych wyrobów w stanie „po wytworzeniu” i niski stopień skomplikowania tej technologii. Wiadome jest, że drukowane elementy metalowe wymagają dodatkowych zabiegów i operacji mających na celu m.in. redukcję naprężeń własnych lub obróbkę wykańczającą powierzchni. Stąd elementy po druku 3D poddaje się przykładowo obróbce cieplnej, obróbce ubytkowej i stosuje się metody obróbki wykańczającej lub gładkościowej m.in. nagniatanie.
- 2) Wersja angielska streszczenia różni się od wersji polskiej. W wersji polskiej nie odnajduje się odpowiednika zdania: *“The aim of the paper was achieved, and the thesis set forth was confirmed.”*
- 3) Str. 13: sformułowanie: „(...) analizy stopnia wytworzenia zaplanowanego stopu w całej objętości napoiny.” – nie jest jasne.
- 4) Str. 18: „Uzyskanie tego typu materiału możliwe było przy zastosowaniu wymuszonych zmian naprężeń, uzyskano drobnoziarniste stopy Cu i Al.”
- 5) Str. 18: „Materiały CuAl mają być alternatywą do materiałów AlCu jako innowacyjną alternatywę umożliwiającą przepływanie prądu w szerszym zakresie częstotliwości.” – zdanie wymaga przeredagowania.
- 6) Str. 18: „Gruba płyta robocza pełni rolę ujęcia ciepła, chroniąc części przed deformacjami w trakcie procesu produkcji.” – zdanie wymaga przeredagowania.

- 7) Str. 48: „*Stopy te charakteryzują się wysoką odpornością na korozję oraz ścieranie (...)*” – powinno być odpornością korozyjną oraz na zużycie ściernie.
- 8) Str. 52: zamiast „*wykonanie obrazów z obserwacji makro i mikroskopowych*” powinno być przykładowo: „*przeprowadzenie badań makro i mikroskopowych*”
- 9) Rysunek 16 – jakość fotografii makrostruktur przekrojów drutów CuAl jest niezadowalająca.
- 10) Str. 50 oraz 57: „*Metodę elektrogravimetryczną wybrano ze względu na jej wysoką precyzję oraz niezawodność w analizie metali, co było kluczowe w kontekście weryfikacji równomierności rozkładu pierwiastków, takich jak aluminium (Al) i nikiel (Ni), w badanych kompozytach multimetalowych.*” a także „*Metoda elektro-grawimetryczna została wybrana ze względu na jej wysoką dokładność i niezawodność w analizie metali, co było kluczowe przy weryfikacji równomierności rozkładu pierwiastków, takich jak aluminium (Al) i nikiel (Ni), w kompozytach multimetalowych.*” – zbędne powtórzenie informacji; ponadto, zwracam uwagę Autora na fakt, że każda metoda badawcza, w tym elektrogravimetryczna, jest obarczona błędem pomiarowym. Zwrot „*analizowanie równomierności rozkładu pierwiastków*” nie jest dostatecznie klarowny, szczególnie w kontekście metody elektrogravimetrycznej.
- 11) Str. 59: „*W wyniku przeprowadzonych prób spawalniczych oraz obserwacji zachowania materiału w trakcie spawania metodą TIG stwierdzono (...)*” – nie jest jasne, na czym polegała obserwacja „*zachowania materiału*” i czy Autor skupiał się na materiale podłoża czy też materiale dodatkowym?
- 12) Str. 60: „*W efekcie możliwe było tworzenie cienkich napoin o wysokości wynoszącej ok. 20-23 mm, co odpowiadało wymaganiom dotyczącym jakości i precyzji spawania.*” – zdanie wymaga przeredagowania.
- 13) Str. 60: „*(...) w trakcie spawania metodą TIG stwierdzono, że materiały multiwłókniste spawane prądem stałym (DC-) wykazywały trudności w dodawaniu materiału elektrody do ciekłego jeziora.*” – Autor zapewne miał na myśli podawanie spoiwa.
- 14) Str. 62: „*Dodatkowo, zastosowanie gazów argonowych i helowych sprzyja (...)*” – powinno być: mieszanek opartych na bazie argonu i helu.
- 15) Str. 63. „*Ostatecznie, ustalenie optymalnych parametrów druku 3D umożliwiło wykonanie poprawnych bloków, które następnie poddano dalszym badaniom.*” – zdanie wymaga przeredagowania.
- 16) Tabela 4: nie jest jasne, dlaczego próbki wytypowane do badań, wytworzone z materiału komercyjnego oraz multiwłóknistego o zbliżonym składzie chemicznym, napawano metodą TIG stosując różne wartości natężenia łuku (180 A dla materiału komercyjnego, 150 A dla materiału własnego – multiwłóknistego).
- 17) Rozdział 12, wybrane podpisy rysunków z fotografiami SEM opisano jako: „*obszar grani napoiny*” – powinno być: „obszar linii wtopienia” napoiny.

- 18) Tabela 13 stanowi powtórzenie tabeli 5 i nie powinna być zamieszczana powtórnie w rozprawie.
- 19) Tabela 5: Autor powinien zwrócić uwagę, że nie jest możliwe zwiększenie dokładności pomiaru poprzez obliczenie średniej wartości twardości i odchylenia standardowego. Wyniki pomiarów przedstawiono z dokładnością do jednego miejsca po przecinku, natomiast opracowanie statystyczne wyników prezentuje wartości z dokładnością do dwóch miejsc po przecinku. Należy zapewnić spójność prezentacji danych, dostosowując liczbę miejsc po przecinku do dokładności użytego narzędzia pomiarowego.
- 20) Str. 121: „Szczególną uwagę zwrócono na materiały o wysokiej zawartości aluminium oraz dodatku niklu, które mogą charakteryzować się odmiennymi mechanizmami zużycia w zależności od procesu technologicznego.” – zdanie wymaga przeredagowania. W rozprawie nie odnaleziono analizy mechanizmów zużycia tribologicznego.
- 21) Str. 125: „Powierzchnie wszystkich próbek, poddanych działaniu siły tarcia, wykazywały typową dla tego procesu topografię płaskowyzową, z wzniesieniami o ostrych krawędziach.” – Siła tarcia stanowi siłę utrudniającą przesuwanie się względem siebie stykających się ciał. W testach tribologicznych próbkę zazwyczaj poddaje się działaniu siły nacisku. Efektem testu tribologicznego jest zazwyczaj ubytek materiału identyfikowany jako ślad zużycia (lub tzw. ślad tarcia).
- 22) Str. 128: „To z kolei prowadzi do zróżnicowanego zachowania powierzchni podczas badania, gdzie mikrostruktury o wyższej twardości mogą wykazywać większą odporność na penetrację przeciwpróbki, podczas gdy obszary o mniejszej twardości ulegają szybszemu zużyciu.” – nasuwa się pytanie - które ze składników fazowych zidentyfikowane w strukturze badanych brązów charakteryzowały się „wysoką twardością”?
- 23) Str. 128: Analiza dyfraktogramów napoin CuAl12, WAAM: „grafit, którego obecność w strukturze może wskazywać na wytrącanie węglika w trakcie procesu spawania, co ma wpływ na właściwości tribologiczne oraz odporność na zużycie ślizgowe” – ogólne zależności związane z wpływem grafitu lub węglików w strukturze stopów metali podlegających zużyciu tribologicznemu są dość dobrze opisane w dostępnej literaturze. Natomiast, w przypadku badanych napoin wykonanych z brązów aluminiowych, nie jest jasne jakie jest pochodzenie węgla (grafitu) identyfikowanego wyłączenie w strukturze napoiny CuAl12 oraz jaki typ węglika mógłby powstać.
- 24) Rozprawa doktorska zawiera niepoprawne sformułowania, przykładowo:
- Str. 58: „(...) co wpływa na jakość i stabilność uzyskiwanych napoin” – nie jest jasne co Autor rozumie przez „stabilność napoin”.
  - Str. 75: „(...) Obrazy uzyskane z użyciem elektronów wtórnych (SE) pozwoliły na wizualizację struktury mikroskali badanych napoin, co umożliwiło dokładne zrozumienie morfologii powierzchni i rozkładu faz w różnych obszarach próbek.” – zdanie wymaga przeredagowania.
  - Str.116: „(...) bardziej miękkiej mikrostruktury (...)”
  - Str.119: „(...) różnice w zachowaniu mechanicznym”.

- Str. 116; Autor wielokrotnie posługuje się sformułowaniami typu: „nieco niższe”; „znacznie niższe”; „jeszcze niższe”; „wciąż znacznie niższe” omawiając rezultaty pomiarów twardości i nie precyzuje w dostatecznym stopniu punktu odniesienia, wobec którego oceniano zmianę wartości twardości.
- Str. 119: „Tak duża różnica może wynikać z odmiennych procesów krystalizacji i chłodzenia w metodzie WAAM, co skutkuje inną strukturą mikrokrystaliczną oraz rozmieszczeniem faz stopowych.”
- Str. 119: „Wyniki te wskazują, że metoda druku 3D WAAM może prowadzić do uzyskania bardziej wytrzymałych struktur w porównaniu do tradycyjnej metody TIG (...)” – powinno być „zastosowanie metody WAAM” oraz „wytworzenia struktur o wyższej wytrzymałości”.
- Str. 120: „W przypadku technologii WAAM, proces osadzania kolejnych warstw materiału (...)” – zwrot „proces osadzania” jest charakterystyczny np. dla powłok osadzanych z fazy gazowej m.in. procesy PVD a nie dla warstw napawanych.
- Str. 120: „(...) specyficzny charakter termiczny procesu (...)” lub „(...) w metodzie TIG proces termiczny (...)”
- Str. 125: „Przebieg ten nie był jednak w pełni liniowy, co można tłumaczyć nieregularnościami powierzchni wynikającymi z procesu napawania. Penetracja przeciwpróbki, wykonanej z materiału 100Cr6, prowadziła do momentów zagłębiania się i unoszenia na powierzchni napoiny, co było związane z lokalną twardością materiału oraz jego geometrią.” – akapit wymaga gruntownego przereformowania.
- Str. 127: „Przedstawione obrazy rozwinięcia powierzchni próbek po badaniach tribologicznych, jak również ich topografia, wskazują na niejednorodne zużycie materiału.” – Autor miał zapewne na celu ocenę i zaakcentowanie dużego rozrzutu wartości parametrów stereometrycznych śladu zużycia.
- Str. 128: „Wyniki te sugerują, że procesy wytwarzania, takie jak spawanie metodą TIG oraz druk 3D metodą WAAM, znacząco wpływają na ostateczną charakterystykę powierzchni próbek. Zastosowanie technik o różnym sposobie rozprowadzania ciepła i nakładania materiału prowadzi do powstawania mikrostruktur o odmiennych właściwościach tribologicznych (...)”.
- Str. 136: „Związek  $CuAl_3$  przyczynia się (...)” –  $CuAl_3$  należałoby nazywać fazą międzymetaliczną natomiast w brązach typu Cu-Al-Ni występuje zazwyczaj faza  $Cu_3Al$ .
- Str. 140: „(...) co pozwoliło na szczegółową analizę makro- i mikrostruktury wewnętrznej.”
- Str. 143: „W związku z tym dalsze badania są niezbędne, aby lepiej zrozumieć mechanizmy ochrony i degradacji tych materiałów.”

Mając na uwadze powyższe stwierdzenia, pod względem formalnym praca została opracowana w sposób dostateczny, jej struktura odpowiada przyjętym zasadom dla rozpraw doktorskich, a objętość wynika z potrzeby opisu przeprowadzenia obszernego programu badań.



Podsumowując rozprawa jest oryginalna i ma charakter zarówno poznawczy, ponieważ wnosi nowe elementy do wiedzy o strukturze i właściwościach elementów wykonanych przyrostowo metodą Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) z brązów aluminiowych, jak i niewątpliwie aplikacyjny, polegający na opracowaniu oryginalnej technologii wytwarzania drutów multimetalicznych oraz doborze parametrów procesu WAAM. Tym samym potwierdzono, iż nowo opracowana technologia umożliwia otrzymane multiwłóknistych drutów spawalniczych pozwalających na ich użycie w technologii druku 3D metodą WAAM i klasycznych procesach spawalniczych.

### 3. Podsumowanie i uwagi dyskusyjne

Pomimo ogólnego pozytywnego odbioru rozprawy doktorskiej oraz jej zadowalającej oceny pod względem merytorycznym podczas zapoznawania się z treścią dysertacji nasunęły mi się pewne pytania i uwagi. Proszę o ustosunkowanie się do wyszczególnionych poniżej:

1. Autor w części teoretycznej rozprawy wymienia technologie wytwarzania przyrostowego oraz skupia się na ich charakterystyce pomijając opis właściwości i mikrostruktury drukowanych obiektów. Proszę o informację jakie są typowe wady procesów druku 3D oraz elementów wytwarzanych przyrostowo ze stopów metali rozpatrywane pod kątem kosztochłonności wdrożenia technologii i wykonania elementów, uzyskiwanej struktury i właściwości w stanie po drukowaniu metalowych komponentów oraz jakości powierzchni. Jakimi procesami technologicznymi lub zabiegami obróbki wykańczającej stosowanymi do drukowanych ze stopów metali komponentów?
2. Nie jest jasne czym podyktowany był wybór jako materiału podłoża stali stopowej gat. X12Cr13 – proszę o komentarz.
3. Czy pomiary twardości napoin realizowano i opracowano w oparciu o akty normatywne?
4. Tabela 1: brak jest w niej elementów statystyki opisowej. Ile pomiarów wykonano oraz jaka była powtarzalność składu chemicznego wytwarzanych drutów?
5. Proszę o komentarz i wyjaśnienie, jakie są typowe składniki strukturalne identyfikowane w napoinach typu CuAl i CuAlNi oraz dlaczego w obszarach międzydendrytycznych napoin wykonanych z brązów aluminiowych identyfikuje się wzrost stężenia aluminium w porównaniu do wartości wyznaczonych dla obszaru roztworu stałego (wyniki analizy SEM-EDS)?
6. Wielokrotnie Autor powołuje się na przeprowadzoną „ocenę jakości napoin” nie podając kryteriów w ramach jakich charakteryzował jakość i dokonywał jej oceny. Proszę o syntetyczne wyjaśnienie na czym polegała ocena jakości napoin dokonywana w ramach realizacji części badawczej pracy.
7. Proszę wyjaśnić w jaki sposób dodatek aluminium (lub niklu) wpływał na zmianę twardości otrzymywanych napoin oraz proszę o komentarz czy wynik tej analizy jest zbieżny z danymi literaturowymi.
8. Badania tribologiczne zrealizowano stosując różne warunki testów (np. siłę obciążającą 5 N i prędkość liniową 1 cm/s (WAAM) oraz 10 N i 50 cm/s (TIG)) co Autor częściowo uzasadnia

w treści rozprawy. W celu umożliwienia przybliżonej oceny porównawczej odporności na zużycie próbek wytworzonych metodami TIG oraz WAAM sugeruję wyznaczyć i przeanalizować wartości ich współczynników zużycia tzw. *wear factor*. Proszę o przedstawienie takiej analizy. Ponadto, proszę Doktoranta o komentarz na temat wpływu zastosowanej prędkości liniowej na odporność na zużycie tribologiczne lub identyfikowane mechanizmy zużycia.

9. Str. 121: „*Wyniki (analizy badań tribologicznych) wykazały, że różnice w mikrostrukturze, wynikające z odmiennych technologii wytwarzania, mają istotny wpływ na właściwości tribologiczne badanych materiałów.*” Wiadome jest, że technologia wytwarzania może wpływać na strukturę materiału, np. poprzez różnice w wielkości ziaren, obecność porowatości, segregację pierwiastków czy różnice w składzie fazowym. Proszę o podjęcie próby wyjaśnienia wpływu zmiany mikrostruktury próbek determinowanej wpływem zawartości aluminium (i dodatku niklu) na ich odporność na zużycie.
10. Właściwości mechaniczne rozpatrywane w obrębie określonej grupy materiałowej (np. brązy) mogą korelować z ich odpornością na zużycie. Czy w ramach przeprowadzonej analizy wyników badań odnotowano istnienie związku pomiędzy twardością próbek a ich odpornością na zużycie lub wartościami współczynnika tarcia?
11. Autor podjął próbę analizy śladów zużycia pod kątem identyfikacji mechanizmów zużycia tribologicznego jednak w zawartej w dysertacji analizie wyników badań nie poddano weryfikacji istnienia zjawisk takich jak m.in. zużycie adhezyjne, mikroskrawanie, mikrożłobienie, zużycie zmęczeniowe lub procesy tribochemiczne. Proszę o przedstawienie głównych (dominujących) mechanizmów zużycia zaobserwowanych w ramach przeprowadzonych badań tribologicznych.
12. Wiadome jest, że stan przygotowania powierzchni do testów tribologicznych i korozyjnych oraz obszar poddawany testom korozyjnym, znacząco wpływają na uzyskiwane wyniki badań. W pracy nie zawarto tych informacji, proszę o ich uzupełnienie.
13. Proszę o komentarz i wyjaśnienie przyczyny najwyższej odporności korozyjnej próbki wykonanej z brązu aluminiowego z dodatkiem niklu (tabela 11).
14. Str. 133 oraz 135: Proszę o wyjaśnienie przyczyn identyfikacji grafitu w składzie fazowym napoin otrzymanych przy użyciu metody WAAM z drutów typu CuAl12.
15. Str. 144: „*Proces druku 3D WAAM wiąże się z możliwością wypalania się włókien składowych multiwłóknistych drutów, co prowadzi do zmiany składu chemicznego napoiny.*” Proszę o komentarz i wyjaśnienie w jaki sposób, wg Autora, może zachodzić przywołany proces „wypalania się włókien składowych multiwłóknistych drutów”.

Wymienione powyżej pytania oraz uwagi nie umniejszają mojej pozytywnej opinii o recenzowanej rozprawie doktorskiej Pana mgr. inż. Jarosław Kalabisa, a praca dotyczy niewątpliwie zagadnień związanych z dyscypliną - *inżynieria materiałowa*. Wyrażam nadzieję, że moje uwagi i komentarze będą stanowiły okazję do dyskusji i okażą się pomocne w dalszych pracach naukowych.

#### 4. Wniosek końcowy

Moja ogólna ocena pracy jest pozytywna. Pan mgr inż. Jarosław Kalabis w przedłożonej rozprawie doktorskiej zrealizował obszerny i ciekawy program badawczy. Uzyskane wyniki są oryginalne zarówno pod względem poznawczym jak i użytkowym. Doktorant, pomimo pewnych niedociągnięć, (mających podłoże głównie stylistyczne w poprawnym formułowaniu opisu zachodzących zjawisk i procesów) wykazał się jednak dojrzałością naukową, samodzielnością w planowaniu i realizacji badań, dość poprawną analizą i interpretacją ich wyników zmierzającą do rozwiązania problemu naukowego, proponując przy tym oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej, a także ogólną wiedzą teoretyczną z zakresu realizowanej tematyki rozprawy doktorskiej. Powyższe cechy pozwoliły na osiągnięcie postawionego celu pracy, sformułowanie wniosków, a w konsekwencji przygotowanie rozprawy na zadowalającym poziomie merytorycznym.

Stwierdzam, że przedłożona 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** wymagania określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późn. zm.) i wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej o dopuszczenie mgr. inż. Jarosława Kalabisa do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Miwośtu Szala