

Prof. dr hab. inż. Tomasz Węgrzyn
Katedra Ruchu Drogowego
Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej
Politechnika Śląska
ul. Krasińskiego 8
40-019 Katowice
e-mail: Tomasz.Wegrzyn@polsl.pl

RECENZJA
rozprawy doktorskiej mgr inż. Przemysława Połaskiego
nt.

„Wpływ warunków technologicznych wytwarzania przyrostowego WAAM-CMT na
wybrane właściwości elementów cienkościennych z drutu 316LSi”

1. Podstawa opracowania

Podstawę formalną opracowania niniejszej recenzji stanowią:

- Pismo przewodnie RND IM 521.22025 Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna dr hab. inż. Marka Wojtyry, prof. Uczelni
- Uchwała nr 252/III-IM/2025 Rady Naukowej Inżynieria Mechaniczna z dnia 8 października 2025 w sprawie powołania recenzentów w postępowaniu mgr inż. Przemysława Połaskiego,
- ustawa z dnia 20 lipca 2018 roku – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tj. Dz.U. z 2024 poz. 1571 z późn. zm. z późn. zm.).

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska pod tytułem „Wpływ warunków technologicznych wytwarzania przyrostowego WAAM-CMT na wybrane właściwości elementów cienkościennych z drutu 316LSi” autorstwa mgr inż. Przemysława Połaskiego zrealizowana w ramach dyscypliny inżynieria mechaniczna.

2. Tytuł rozprawy doktorskiej - aktualność podjętego tematu

Tematyka wytwarzania przyrostowego metodą łukową WAAM (ang. Wire Arc Additive Manufacturing) jest bardzo aktualna zarówno z perspektywy badań naukowych, jak i zastosowań przemysłowych. Proces ten jest używany do wytwarzania przyrostowego metali wykorzystujący łuk elektryczny i drut spawalniczy jako materiał dodatkowy. Proces WAAM-CMT to odmiana procesu, w której zamiast klasycznego łuku MIG/MAG używa się wersji

CMT (Cold Metal Transfer). Ograniczenie ilości ciepła wprowadzanego do materiału osiągnięto przez zmianę sposobu przenoszenia topionego materiału z drutu do jeziora spawalniczego. Proces CMT zapewnia dobrą kontrolę wtopienia przy stosowaniu wysokich natężeń prądu. W przemyśle technologie addytywne są stosowane do budowy i regeneracji elementów maszyn i odpowiedzialnych konstrukcji. Doktorant wykonał liczne, dobrze zaplanowane i bardzo dokładne badania dotyczące oceny własności użytkowych wszystkich otrzymanych wydruków WAAM, co pozwoliło na uzyskanie bazy danych do interpretacji stanu zagadnienia. Badania naukowe prowadzące do analizy struktury i właściwości napawanych metali stosowanych w budowie maszyn i na konstrukcje są zasadne. Podjęcie przez Autora badań nad efektami wpływu różnych parametrów na własności wydruków WAAM-CMT jest w pełni uzasadnione. Tematyka rozprawy i jej zakres są niezwykle aktualne. Podjęty w rozprawie temat wnosi znaczny wkład w rozwój dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna.

3. Charakterystyka i ocena rozprawy - ocena metodyczna (ocena układu rozprawy doktorskiej, ocena zastosowanego piśmiennictwa)

W swojej rozprawie doktorskiej mgr inż. Przemysław Połaski podjął próbę oceny własności mechanicznych i odporności korozyjnej różnych wydruków WAAM, gdzie dominującą fazą był austenit. Przewód doktorski jest realizowany w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Układ rozprawy doktorskiej jest prawidłowy. Rozprawa podzielona jest na 11 rozdziałów, całość liczy 240 stron, zawiera spis literatury obejmujący 217 pozycji publikacyjnych. Przegląd piśmiennictwa jest wykonany bardzo starannie. Cytowane pozycje literaturowe są aktualne. Większość pozycji literaturowych stanowią najnowsze publikacje międzynarodowe, w tym artykuły Autora dysertacji. W rozprawie można zauważyć racjonalne zaplanowanie eksperymentu i prawidłowy dobór metod badawczych. Doktorant przedstawił sposób przygotowania próbek i metodykę badań zgodną z aktualnymi normami. Szczegółowo zaprezentowano wykorzystaną w prowadzonych eksperymentach aparaturę badawczą. Dla każdego z rozważanych w pracy wydruków zostały przedstawione i precyzyjnie zinterpretowane wyniki badań. Należy docenić staranne i dokładne opracowanie wyników badań.

4. Ocena merytoryczna rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska dotyczy opracowania nowego rozwiązania materiałowo-technologicznego związanego z możliwością uzyskania wydruków WAAM z drutu elektrodowego 316LSi o zbliżonych właściwościach mechanicznych do stali 316L. Doktorant prowadził badania prowadzące do podniesienia własności mechanicznych i odporności korozyjnej wydruków WAAM wykorzystując metodę CMT ograniczającą ilość ciepła wprowadzonego do materiału, zwłaszcza dla wytwarzania struktur cienkościennych. W ramach rozprawy doktorskiej wykonano szereg prób wytwarzania wydruków WAAM-CMT różnymi

parametrami procesu w celu zapewnienia niskiej energii liniowej. Przeprowadzono badania wpływu długości wolnego wylotu elektrody oraz natężenia prądu napawania na strukturę, właściwości mechaniczne oraz odporność korozyjną. Badania dotyczyły także wpływu geometrii podłoża napoiny na naprężenia w układzie podłoże-napoina. W rozprawie nie ma postawionej tezy, ale można się jej domyślić z przebiegu badań, że *zastosowanie procesu WAAM-CMT przy zastosowaniu drutu elektrodowego 316LSi pozwoli na wytworzenie wydruków o bardzo dobrych własnościach użytkowych porównywanym ze stalą 316L*. Na uwagę zasługuje wiedza Doktoranta z wielu obszarów badawczych, zwłaszcza umiejętność prowadzenia badań pod mikroskopem świetlnym i skaningowym. Doktorant wykazał się ponadto umiejętnością obsługi systemu CKO do pomiaru odkształceń i przemieszczeń oraz dobrą znajomością programów MES. Pracę wieńczy dokładne podsumowanie wszystkich badań i precyzyjnie sformułowane wnioski.

W rozdziale 1. pt. „Wstęp” przedstawiono znaczenie technologii przyrostowej oraz podano klasyfikacje metod addytywnych.

W rozdziale 2. pt. „Wytwarzanie przyrostowe WAAM” Autor przedstawił ważniejsze metody spawalnicze stosowane do wydruków. Opisano metody spawalnicze z zastosowaniem elektrody topliwej i nietopliwej. Doktorant scharakteryzował proces CMT.

W rozdziale 3. pt. „Materiały stosowane w technologii WAAM” Autor szczegółowo przedstawia najważniejsze materiały stosowane do wydruków. Omówiono znaczenie technologii WAAM w przetwarzaniu stali 316L i jej pokrewnych.

W rozdziale 4. pt. „Ciepło w procesie WAAM” Autor wyjaśnia jaką rolę w tworzeniu wydruków odgrywa energia liniowa spawania oraz mechanizmy rozpraszania ciepła. Omówiono model źródła ciepła stosowany w modelowaniu numerycznym procesu napawania łukowego.

W rozdziale 5 pt. „Struktura i właściwości stali 316L i jej złączy spawanych” zebrano najważniejsze informacje dotyczące faz występujących w badanym materiale i w napoinach. Szczegółowo opisano austenit, ferryt delta i fazę sigma. Przedstawiono własności mechaniczne i antykorozyjne stali 316L.

W rozdziale 6. pt. „Wpływ technologii WAAM na właściwości wydruków z drutu 316L/ER316LSi” Doktorant scharakteryzował wpływ procesu WAAM na właściwości mechaniczne wydruków z materiałów 316 L i 316LSi takie jak wytrzymałość na rozciąganie, granica plastyczności, twardość. Omówiono wpływ parametrów procesu WAAM na strukturę napoin a także na stan powierzchni wydruków. Uwagę poświęcono odporności korozyjnej i naprężeniom własnym wydruków.

W rozdziale 7. pt. „Modelowanie numeryczne procesu wytwarzania przyrostowego” zostały przedstawione metody modelowania numerycznego zagadnień spawalniczych. Szczególnie skoncentrowano się na omówieniu metod modelowania.

W rozdziale 8. pt. „Podsumowanie” ustosunkowano się do wszystkich informacji przedstawionych w części literaturowej.

W rozdziale 9. pt. „Cel pracy i program badań” opisano harmonogram opisanych badań, przedstawiono przedmiot badań w postaci wielowarstwowej cienkościennej napoiny wykonanej na stalowym podłożu a także przeprowadzono badania wstępne celem określenia okna technologicznego możliwych do zastawiania parametrów. Badania wstępne polegały na analizie struktury geometrycznej powierzchni wytworzonych napoin wykorzystując profilometr oraz skaner 3D. Analizowano grubość poszczególnych warstw wydruku. Przedstawiono cel pracy, którym jest wyznaczenie warunków procesu napawania przyrostowego metodą WAAM-CMT umożliwiającą wytwarzanie przestrzennych struktur z drutu elektrodowego 316LSi przy zachowaniu odpowiedniej jakości geometrii powierzchni oraz właściwości mechanicznych.

W rozdziale 10. pt. „Wyniki badań” wykonano badania powtarzalności procesu napawania przyrostowego z drutu 316LSi. Określono wpływ wolnego wylotu elektrody na geometrię i stan powierzchni, twardość i strukturę materiału. W celu określenia wpływu natężenia prądu napawania na właściwości wydruku wykonano liczne badania, z których najważniejsze to: próby korozyjne, wytrzymałość na rozciąganie, SGP (struktura geometryczna powierzchni), badania strukturalne. Wykonano bardzo profesjonalne badania numeryczne w celu zbadania ewolucji naprężeń własnych w trakcie procesu napawania wielościgowego i rozkładu naprężeń po procesie. Model MES został skalibrowany z wykorzystaniem danych termicznych z kamery termowizyjnej oraz zwalidowany na podstawie pomiarów ugięć wykorzystując metodę CKO. Ważnym autorskim osiągnięciem Doktoranta była konstrukcja przyrządu do kontrolowanego uwalniania naprężeń poprocesowych, wykorzystanego w pomiarach CKO.

W rozdziale 11. pt. „Analiza i dyskusja wyników” podsumowano wyniki z części rozpoznawczej i zasadniczej badań oraz podjęto próbę wyjaśnienia wpływu natężenia prądu oraz wolnego wylotu elektrody na strukturę, odporność korozyjną, właściwości mechaniczne oraz stan powierzchni wydruku. Cel pracy został zrealizowany.

5. Uwagi krytyczne i redakcyjne

Koncepcja badań doświadczalnych została sformułowana przez Doktoranta starannie i poprawnie. Realizację badań oceniam bardzo pozytywnie. Eksperymentalna część rozprawy jest przejrzysta i zawiera szereg wartościowych wyników i informacji. Doceniam trafnie przyjęty zakres metod badawczych. Forma prezentowania wyników, profesjonalny sposób ich analizy oraz przedstawione wnioski świadczą o dojrzałości badawczej Doktoranta. W trakcie analizy rozprawy nasunęły mi się dwie uwagi o charakterze ogólnym i cztery uwagi szczegółowe niemające wpływu na wysoką ocenę merytoryczną pracy.

Uwagi ogólne dotyczą uzupełnienia wybranych informacji zawartych w dysertacji i zostały przedstawione w formie pytań do Doktoranta:

1. Na stronie 43 jest zdanie: *„Stal 316L należy do grupy stali austenitycznych o jednofazowej strukturze, wykazującej właściwości paramagnetyczne”*. W drugim zdaniu poniżej Doktorant pisze, że *„Stal 316L (1.4404) typowo ma fazową strukturę składającą się z austenitu i ferrytu δ wysokotemperaturowego”*. Jeszcze kilka zdań niżej podano, że *„Udział chromu na poziomie 10-12% umożliwia wytwarzanie na powierzchni materiału pasywnej warstwy Cr_2O_3 ”*. Najbezpieczniej jest podać, że dominującą fazą w stali 316L jest austenit.
2. Doktorant podaje (str. 47), że *„Informacje dostępne w literaturze sugerują, że skład pierwiastkowy fazy sigma σ może być dość szeroki, co wynika z tego, że może wydzielić się z austenitu, ferrytu, na granicach międzyfazowych, a nawet z węglików”*. Pisząc o składzie chemicznym fazy sigma (str. 47) powinno się przede wszystkim przedstawić wykres równowagowy Fe-Cr i podać, że w literaturze nie ma zgodności co do temperatury, w której ta faza powstaje (jest bardzo dużo autorskich wykresów). Natomiast, ze wszystkich znanych wykresów równowagowych Fe-Cr wynika, że faza sigma powstaje z ferrytu. Sformułowanie *„Skład pierwiastkowy fazy sigma może być szeroki”*, wynika z dużej rozpuszczalności fazy sigma, którą najwygodniej jest interpretować na podstawie wykresu równowagowego Fe-Cr. Z wykresu równowagowego Fe-Cr wynika, że faza sigma nie powstaje w wyniku przemiany eutektoidalnej, którą Pan przedstawia w równaniu 12. Panuje wprawdzie pogląd, że w stalach austenitycznych faza sigma może powstać z przemiany eutektoidalnej, ale z austenitu, której produktem podczas chłodzenia jest mieszanina fazy sigma i zubożonego austenitu. W rozprawie brak jest wyjaśnień z jakich węglików i wg jakiego mechanizmu może powstać faza sigma (z węglików)? Proszę o wyjaśnienia.

Do uwag szczegółowych zaliczam:

1. Czy do identyfikacji struktury zawierającej ferryt delta i fazę sigma w materiale wydruku używano tego samego odczynnika trawieniowego opisanego w rozdziale 10.2.2?
2. Dlaczego nie występowała faza sigma w badanych wydrukach, skoro z cytowanych publikacji wynika, że ta faza może się wydzielić.
3. Rozdział „Przyszłe kierunki badań” powinien być napisany jako rozdział 12, a nie jako podpunkt rozdziału 11, w którym jest prowadzona analiza i dyskusja wyników.
4. Drobne literówki, brak spacji, podwójne kropki (str. 30, 48, 99). W opisie rysunku 4.3. brakuje litery „V” w symbolu stopu Ti.

6. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Przemysław Połaskiego pt. „Wpływ warunków technologicznych wytwarzania przyrostowego WAAM-CMT na wybrane właściwości elementów cienkościennych z drutu 316LSi” jest interesującą dysertacją o aktualnej tematyce. Istotnym osiągnięciem Doktoranta jest opracowanie sposobu poprawy własności wydruków WAAM-CMT ze stali nierdzewnej. Rozprawa wnosi istotny wkład w rozwój dyscypliny naukowej „Inżynieria mechaniczna”.

Doktorant wykazał się umiejętnością dobrego planowania i wykonywania badań oraz analizy merytorycznej uzyskanych wyników. Autor osiągnął cel postawiony w pracy, dochodząc do wyników mających duże znaczenie poznawcze. Całość recenzowanej rozprawy w pełni potwierdza wiedzę teoretyczną Doktoranta oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowo-badawczej. Doktorant wykazał się wiedzą z wielu obszarów, zwłaszcza ze spawalnictwa, mechaniki, materiałoznawstwa, którą doskonale wykorzystał do rozwiązywania problemu naukowego z dyscypliny „Inżynieria mechaniczna”.

Podsumowując stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki określone w wszystkie wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2020 r. poz. 85 z późn. zm.) i wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony. Z uwagi na wskazane atuty w pracy i osiągnięcia w dyscyplinie naukowej wnioskuję o jej wyróżnienie.

Katowice, 14. XI 2025 r

Tomasz Węgrzyn