

Prof. dr hab. inż. Jacek Słania
Sieć Badawcza ŁUKASIEWICZ
– Górnośląski Instytut Technologiczny
Centrum Spawalnictwa
ul. K. Miarki 12/14
44-100 Gliwice

Gliwice, 10 listopada 2025 r.

RECENZJA

pracy doktorskiej mgr inż. Przemysława Połaskiego pt:

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

wykonana na zlecenie Rady Naukowej Dyscypliny

Inżynieria Mechaniczna

Politechniki Warszawskiej

na podstawie uchwały z dnia 08 października 2025 r.

Wprowadzenie

Wysokie wymagania dotyczące właściwości eksploatacyjnych części i wyposażenia maszyn i urządzeń powodują konieczność stosowania do ich wytwarzania nowych materiałów konstrukcyjnych oraz nowoczesnych technologii. Jednymi z najnowocześniejszych i równocześnie najbardziej powszechnie stosowanymi w przemyśle technologiami są technologie spawalnicze. Technologie te są ważnym elementem wytwarzania części maszyn i urządzeń o specjalnych właściwościach użytkowych. Szczególnie intensywnie rozwijają się obecnie technologie wytwarzania przyrostowego, bazujące na procesach spawalniczych. Procesy spawalnicze są procesami specjalnymi, to jest takimi, których wyniku nie można ocenić w trakcie ich trwania, a niezgodności mogą się ujawnić dopiero po ich zakończeniu. Z tego względu zasadne i konieczne jest szczegółowe zbadanie tych procesów w celu ich wykorzystania do precyzyjnego kształtowania właściwości eksploatacyjnych elementów wytworzonych przyrostowo. Nie jest to jednak możliwe bez znajomości właściwości fizycznych i wynikających z nich właściwości eksploatacyjnych, w tym właściwości mechanicznych, jakości powierzchni, rozkładu naprężeń spawalniczych oraz odporności korozyjnej. Zagadnienie wpływu warunków technologicznych wytwarzania przyrostowego na właściwości wytworzonych tą metodą elementów jest dotychczas zbadane w niewielkim stopniu.

Podjęcie przez mgr inż. Przemysława Połaskiego pracy doktorskiej o charakterze teoretycznym – doświadczalnym pt: **„Wpływ warunków technologicznych wytwarzania przyrostowego WAAM-CMT na wybrane właściwości elementów cienkościennych z drutu 316LSi”** należy uznać za wybór trafny ze względu na znaczenie tematyki w zakresie poznawczym, jak również możliwość praktycznego zastosowania wyników badań. Problematyka, którą Doktorant podjął jest mało zbadana, a przy tym bardzo istotna z

naukowego i użytkowego punktu widzenia. Dlatego uważam, że temat pracy jest uzasadniony, interesujący i aktualny.

Treść rozprawy

Praca doktorska pt: **„Wpływ warunków technologicznych wytwarzania przyrostowego WAAM-CMT na wybrane właściwości elementów cienkościennych z drutu 316LSi”** składa się z dwóch podstawowych części, to jest części literaturowej oraz części badawczej i zawiera 240 strony tekstu, 39 tabel, 140 rysunków oraz 217 pozycji bibliograficznych.

W części literaturowej Doktorant przedstawił zagadnienia dotyczące technologii przyrostowych. W tej części szczegółowo omówił znaczenie technologii przyrostowych, klasyfikację metod druku 3D oraz zagadnienia dotyczące wytwarzania przyrostowego WAAM jako metody spawalniczej. Opisał stosowaną do wytwarzania przyrostowego metodę CMT, materiały stosowane w wytwarzaniu przyrostowym oraz zagadnienia ciepła w tym procesie. Szczególnie dokładnie przedstawił strukturę i właściwości stali 316L i jej złączy spawanych, w tym zagadnienia dotyczące ferrytu delta, fazy sigma, korozję oraz właściwości mechaniczne. Szeroko omówił wpływ technologii WAAM na właściwości wydruków z drutu 316L/ER316LSi odnosząc się do mikrostruktury napoin, ferrytu delta i fazy sigma w procesie WAAM, korozji napoin, ich właściwości mechanicznych, twardości i mikrotwardości, stanu powierzchni wydruków i pomiarów geometrii, chropowatości, naprężeń własnych, metod ich ograniczania i pomiaru. Część teoretyczną Autor zakończył zwięzłym podsumowaniem, w którym dokonał krytycznej oceny obecnego stanu wiedzy w odniesieniu do procesów wytwarzania przyrostowego oraz ich wyniku, to jest stanu naprężeń, odporności korozyjnej, geometrii detalu i stanu powierzchni. Na szczególne podkreślenie zasługuje trafny wybór zagadnień przedstawionych w części literaturowej, stosowny do tematu pracy zakres ich omówienia oraz bardzo wyczerpujący i przejrzysty sposób prezentacji.

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literaturowego Autor sformułował cel poznawczy pracy, którego istota sprowadza się do wyznaczenia warunków procesu napawania przyrostowego metodą WAAM – CMT umożliwiających wytwarzanie przestrzennych struktur z drutu elektrodowego 316LSi przy zachowaniu odpowiedniej geometrii powierzchni i właściwości mechanicznych.

Z przedstawionego celu wynikał zakres i metodyka badań przedstawionych w drugiej, doświadczalnej części pracy.

W tej części pracy Doktorant przeprowadził obszerne badania, których celem była doświadczalna analiza wpływu warunków technologicznych procesu wytwarzania przyrostowego na jego powtarzalność, badanie wpływu natężenia prądu spawania oraz wolnego wylotu drutu elektrodowego na geometrię elementu, jego strukturę fazową i stan powierzchni, badanie twardości, właściwości wytrzymałościowych, odporności korozyjnej, stanu naprężeń własnych oraz badania makro- i mikrostrukturalne.

Uzyskane wyniki Autor przedstawił w postaci tabelaryzowanych wartości liczbowych, wykresów i modeli. Całość badań zakończył obszernym i wnikliwym podsumowaniem.

Na podstawie uzyskanych wyników Doktorant sformułował 12 wniosków o charakterze badawczym i użytkowym dotyczących warunków technologicznych wytwarzania przyrostowego WAAM – CMT na wybrane właściwości elementów cienkościennych z drutu 316LSi.

Ocena rozprawy oraz uwagi ogólne

Wybór tematu rozprawy doktorskiej należy uznać za bardzo trafny i aktualny, mieszczący się we współczesnych tendencjach rozwojowych zastosowania badań procesów adytywnych. Doktorant przeprowadził obszerne badania doświadczalne mające na celu sprawdzenie związku między warunkami wytwarzania przyrostowego a właściwościami wytworzonych w ten sposób elementów.

Stanowi to znaczący, nowatorski wkład Doktoranta w rozwój badań nad wytwarzaniem przyrostowym z zastosowaniem technik spawalniczych.

Na szczególne podkreślenie zasługuje:

- bardzo starannie, rzeczowo i wyczerpująco opracowana część teoretyczna pracy,
- szeroki zakres badań obejmujący geometrię, kształt elementu, stan powierzchni, właściwości mechaniczne, makro- i mikrostrukturę, stan naprężeń własnych i odporność korozyjną,
- zastosowanie nowoczesnych metod badań i aparatury badawczej, zwłaszcza w odniesieniu do badań geometrii, stanu powierzchni i naprężeń,
- opracowanie modelu MES procesu WAAM i jego doświadczalna walidacja.

W pierwszej części rozprawy Doktorant dokonał przeglądu dwustu czterdziestu pozycji literatury dotyczącej badanego zagadnienia, uwzględniając ważne publikacje ostatniej dekady. W tym zakresie Doktorant wykazał się dobrą znajomością zagadnienia i prawidłową oceną zjawisk związanych z wytwarzaniem przyrostowym metodami spawalniczymi.

Ogólna koncepcja badań doświadczalnych została sformułowana przez Autora poprawnie, a jej realizację oceniam pozytywnie. Eksperymentalna część rozprawy jest obszerna i zawiera szereg wartościowych wyników i informacji. Dotyczy to zwłaszcza wyników badań aparaturowych oraz szerokiej, szczegółowej i ciekawej analizy wyników wraz z ich podsumowaniem. Doktorant skutecznie zastosował nowoczesne, doświadczalne metody badań. W wyniku przeprowadzonych obszernych i różnorodnych badań uzyskał interesujące i wartościowe wyniki, które następnie poprawnie zinterpretował.

W podsumowaniu chciałbym podkreślić, że zaplanowany cel i zakres pracy zostały osiągnięte i dlatego całość rozprawy doktorskiej mgr inż. Przemysław Połaskiego oceniam pozytywnie. Doceniam zwłaszcza trafnie przyjęty zakres metod badawczych oraz dużą liczbę przeprowadzonych badań. Forma prezentowania wyników, rzeczowy sposób ich analizy

oraz przedstawione wnioski świadczą o dojrzałości badawczej Doktoranta. Sposób przygotowania rozprawy i jej szata graficzna zasługują na bardzo wysoką ocenę.

W trakcie szczegółowej analizy rozprawy nasunęło mi się jednak kilka uwag ogólnych dotyczących jej treści, warunków prowadzenia badań oraz zakresu eksperymentu.

1. Na stronie 33 w opisie do rysunku 2.10 Doktorant podał, że jest to przykład charakterystyki prądowo napięciowej procesu CMT. Uważam, że bardziej trafne będzie określenie „Przykład przebiegów wartości chwilowych natężenia prądu i napięcia łuku spawalniczego w metodzie CMT”
2. W rozdziale 4 Autor szczegółowo opisuje zagadnienia ciepła w procesie WAAM. Proszę o wskazanie, gdzie w części badawczej pracy odniesiono się do zagadnień przedstawionych w tym rozdziale.
3. Doktorant w swojej pracy prowadził istotne ze względu na właściwości eksploatacyjne badania odporności korozyjnej, natomiast nie wymienił ich w programie badań przedstawionym na stronach 102 – 103.
4. W rozdziale 9.3.1 Autor przedstawił sposób określenia okna technologicznego parametrów. Proszę o omówienie planu eksperymentu.
5. W tym samym rozdziale przedstawił w sposób opisowy analizę wyników badań. Sugeruję uzupełnienie jej o równania regresji wielokrotnej.
6. Na stronie 163 Autor napisał „Natomiast wraz ze wzrostem natężenia prądu pogłębiają się różnice w wartościach wydłużenia”. Proszę o wyjaśnienie przyczyny.
7. Proszę o informację, czy były wykonywane badania nieniszczące objętościowe elementu.

Najważniejsze uwagi szczegółowe

1. W spisie treści Autor podał punkt 11.1 Przyszłe kierunki badań. Przyjmuje się, że jednego podpunktu się nie wyszczególnia i sugeruję wyodrębnienie tego zagadnienia jako punkt 12.
2. W kilku miejscach użyto terminu „temperatury” (liczba mnoga). Proponuję używanie wyłącznie liczby pojedynczej.
3. W pracy wymiennie stosowany jest termin „palnik” i termin „uchwyt spawalniczy”. Proponuję stosowanie terminu „uchwyt spawalniczy”.

Podsumowanie i wniosek końcowy

Pomimo wymienionych uwag ogólnych i szczegółowych stwierdzam, że Autor osiągnął cel postawiony w pracy, dochodząc do wyników mających znaczenie nie tylko poznawcze, ale również szczególnie istotnych dla zastosowania wiedzy z zakresu warunków technologicznych wytwarzania przyrostowego metodami spawalniczymi na właściwości elementów cienkościennych do praktyki przemysłowej. Całość recenzowanej rozprawy w pełni potwierdza wiedzę teoretyczną Doktoranta oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowo – badawczej.

Uważam, że opiniowana rozprawa doktorska spełnia wymagania stawiane przez obowiązującą ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Na tej podstawie składam wniosek o dopuszczenie mgr inż. Przemysława Połaskiego do publicznej obrony rozprawy doktorskiej przed Radą Naukową Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej.

Proponuję wyróżnienie przedstawionej rozprawy doktorskiej.

