



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

dr hab. inż. Dariusz Fydrych, prof. uczelni
Instytut Technologii Maszyn i Materiałów
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa
Politechnika Gdańska
ul. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk

Gdańsk, 5 grudnia 2025

RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Przemysława Połaskiego pt.:
„Wpływ warunków technologicznych wytwarzania przyrostowego WAAM – CMT
na wybrane właściwości elementów cienkościennych z drutu 316LSi”
wykonanej pod opieką promotora Pana dr. hab. inż. Dariusza Golańskiego, prof. PW
opracowana na zlecenie Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna
Politechniki Warszawskiej
z dnia 20 października 2025 r.

Wprowadzenie

Techniki addytywne odgrywają coraz większą rolę w nowoczesnym przemyśle i nauce, oferując nowe możliwości projektowania oraz wytwarzania elementów metalowych. W ramach grupy AM (Additive Manufacturing) metoda WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) zajmuje szczególne miejsce jako proces z podgrupy DED (Directed Energy Deposition), w którym wykorzystuje się łuk elektryczny i drut jako materiał dodatkowy. Rozwiązanie to wyróżnia się wysoką wydajnością, niskimi kosztami materiałowymi i zdolnością do kształtowania elementów o dużych gabarytach, a także szeroką elastycznością materiałową. Technologia ta znajduje zastosowanie m.in. w lotnictwie, energetyce oraz przemyśle morskim, gdzie umożliwia wytwarzanie zarówno części wielkogabarytowych, jak i prototypów funkcjonalnych. Jednocześnie WAAM wiąże się z szeregiem wyzwań, takich jak kontrola geometrii, jakość powierzchni, powtarzalność właściwości czy minimalizacja naprężeń i porowatości. Aktualne badania koncentrują się na modelowaniu procesu, automatyzacji, zaawansowanym monitorowaniu oraz hybrydowych strategiach obróbki, co podkreśla dynamiczny rozwój tej technologii.

Przedmiot, cel i zakres pracy został właściwie dobrany w kontekście analizy aktualnych trendów badawczych w obszarze technologii przyrostowych, w szczególności procesu WAAM. Tematyka ta jest niezwykle aktualna, a wyniki badań cieszą się rosnącym zainteresowaniem zarówno w środowisku naukowym, jak i w sektorze przemysłowym. O dynamicznym rozwoju

Fydrych

i wysokim potencjale badawczym technologii WAAM świadczy fakt, że każdego roku publikowanych jest wiele artykułów naukowych, raportów badawczych oraz zgłoszeń patentowych dotyczących zagadnień technologicznych, materiałowych i aplikacyjnych tej metody. Niewątpliwie procesy przyrostowego kształtowania metali z wykorzystaniem łuku elektrycznego należą obecnie do najszybciej rozwijających się kierunków badawczych nie tylko w dziedzinie additive manufacturing, ale również w szerzej rozumianych technologiach wytwarzania. Na podstawie merytorycznej analizy zakresu i treści pracy jednoznacznie stwierdzam, że wpisuje się ona w dyscyplinę naukową Inżynieria Mechaniczna.

Charakterystyka i ocena formalna rozprawy

Pan mgr inż. Przemysław Połaski przedstawił do oceny rozprawę doktorską, która pomimo swojej obszerności (240 stron) jest czytelnie skomponowana, co wynika m.in. z jej klasycznego układu. W rezultacie treść opracowania odebrałem jako właściwie uporządkowaną i łatwą w śledzeniu.

Rozprawa składa się ze streszczenia w języku polskim i angielskim, spisu treści, wykazu ważniejszych oznaczeń i skrótów oraz 8 rozdziałów, które obejmują wstęp, charakterystykę stanu wiedzy przedstawioną w sześciu rozdziałach oraz podsumowanie tej części pracy. Kolejne rozdziały zawierają opis celu i zakresu pracy (rozdział 9), rozbudowany rozdział 10 z wynikami badań własnych, obszerną analizę wyników (rozdział 11) oraz nienumerowany rozdział z wnioskami. Ponadto rozprawa zawiera spisy bibliografii, rysunków i tabel.

Pierwsze 101 stron pracy poświęcone jest analizie stanu wiedzy w świetle literatury i stanowi kanwę, na podstawie której Pan mgr inż. Przemysław Połaski zaprezentował motywację podjęcia tematyki. Wstęp zawiera ogólne wprowadzenie do tematyki pracy, obejmujące przedstawienie znaczenia przemysłowego technologii z grupy additive manufacturing oraz ich klasyfikację. Kolejne rozdziały (2–4) Autor poświęcił szczegółowej charakterystyce technologii WAAM, prezentując jej ideę, klasyfikację, wady, zalety oraz zagadnienia materiałowe. W rozdziale 5. Autor zaprezentował charakterystykę spawalności stali 316L, natomiast rozdział 6. stanowi połączenie wcześniej omówionych zagadnień: druku WAAM oraz spawalności technologicznej i metalurgicznej stali 316L. Modelowanie numeryczne procesu wytwarzania przyrostowego zostało omówione w ramach rozdziału 7. W rozdziale 8. zatytułowanym „Podsumowanie” Doktorant przedstawił racjonalne uzasadnienie podjęcia się realizacji tematu, bez podania tezy pracy. Wprawdzie przedstawienie tezy nie jest formalnym wymogiem, jednak w rozprawach naukowych przygotowywanych na poziomie doktoratu zazwyczaj się ją formułuje. Rozdział 9. zawiera następujący cel pracy:

„Celem pracy było wyznaczenie warunków procesu napawania przyrostowego metodą WAAM-CMT umożliwiających wytwarzanie przestrzennych struktur z drutu elektrodowego 316LSi przy zachowaniu odpowiedniej jakości geometrii powierzchni oraz właściwości mechanicznych.”

oraz program badań służących osiągnięciu postawionego celu, opis przedmiotu badań i stanowiska badawczego, a także wyniki badań wstępnych, w tym kluczowe dla realizacji badań właściwych wyznaczenie zakresów (okna) parametrów technologicznych.

Obszerny (prawie 100 stron) rozdział 10. opisuje wyniki badań, natomiast ostatnią (podzieloną na trzy sekcje) merytoryczną część pracy stanowi analiza i dyskusja wyników oraz wnioski. Bibliografia została przygotowana profesjonalnie, jest właściwie sformatowana (z nielicznymi błędami) i umożliwia pełną identyfikację źródeł. Obejmuje 217 pozycji dobranych z szerokiego i aktualnego dorobku polsko- i anglojęzycznego, w tym 4 prace współautorstwa Pana mgr. inż. Przemysława Połaskiego. Godne podkreślenia jest, że mimo dużej liczby publikacji o tej tematyce Doktorant przeprowadził rzetelny przegląd literatury i trafnie wybrał najistotniejsze źródła.

Rozprawa jako opracowanie naukowe traktowane jednocześnie jako raport z badań wywarła na mnie bardzo pozytywne wrażenie. Podsumowując ocenę formalną pracy chciałbym podkreślić jej wyróżniający poziom pod względem redakcyjnym, a zwłaszcza graficznym. Nieco gorzej wypada ona w kontekście przygotowania językowego. Natomiast schematy, rysunki i wykresy są czytelne i zasługują na najwyższą ocenę. Również udokumentowane wyniki badań metalograficznych są wyjątkowo starannie przedstawione. Poniżej wymieniam najważniejsze uwagi redakcyjne, które nasunęły mi się podczas lektury, licząc na to, że okażą się one pomocne w dalszych pracach Doktoranta:

1. W pracy, co jest widoczne już w spisie treści, Doktorant używa kilku różnych oznaczeń drutu: „316L/ER316LSi”, „ER316L/ER316LSi” oraz „316L/316LSi”. Również inne terminy są zapisywane w odmienny sposób, np. TOPTIG” (strona 33) i „TOP-TIG” (strona 27.).
2. Słowa kluczowe (strona 7.): „Stal 316L, 316LSi” – brakuje „stal” w przypadku 316LSi. Dotyczy to również słów kluczowych w języku angielskim (strona 8.)
3. „w latach 60 XX wieku”, „W latach 80 XX wieku”, „w latach 90 pojawiły się” - po liczebnikach porządkowych zapisywanych cyframi arabskimi stawia się kropkę.
4. „ilość warstw” powinno być: „liczba warstw”
5. „ilość ciepła rozpraszanego na drodze promieniowania jest w silnej korelacji od temperatury” powinno być: „Ilość ciepła rozpraszanego drogą promieniowania jest w silnej korelacji z temperaturą”
6. „Wykres Scheaflera pozwala dość precyzyjnie określić ilość ferrytu” powinno być: „Wykres Schaefflera pozwala stosunkowo precyzyjnie oszacować zawartość ferrytu”. Autor czterokrotnie używa błędnego zapisu nazwiska Schaeffler.

Fedyn

7. „Minimalne właściwości mechaniczne stali 316L będą silnie zależały od stan dostawy.”
Powinno być: „Minimalne właściwości mechaniczne stali 316L silnie zależą od stanu dostawy.”

Inne stwierdzone przeze mnie niedoskonałości redakcyjne obejmują: braki znaków interpunkcyjnych, brak spacji przed jednostkami oraz niekonsekwentne stosowanie wielkich liter w nazwach procesów (tabela 1.1.). Znalazłem również znaczną liczbę literówek, np.: „kropi” zamiast: „kropi”, „eklektycznego” zamiast: „elektrycznego”, „Mpa” zamiast: „MPa”, „porzecznego” zamiast: „poprzecznego”. Rozdział tradycyjnie tytułowany „Spis literatury” doktorant zatytułował „Bibliografia”. W przyszłości proszę zwrócić uwagę na subtelne różnice semantyczną między tymi pojęciami.

Ocena merytoryczna rozprawy

Treść opiniowanej rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Przemysława Połaskiego odpowiada jej tytułowi i uważam ją za bardzo wartościową pod względem merytorycznym i praktycznym. Autor właściwie zrealizował założone zadania badawcze, dokonując obszernego przeglądu literatury oraz proponując plan badań ściśle odpowiadający celom pracy, przy uwzględnieniu zaawansowanych metod badawczych. W dalszej kolejności przeprowadził kompleksowe i wzajemnie uzupełniające się badania eksperymentalne i analizy numeryczne, co umożliwiło otrzymanie wyników, które posłużyły do sformułowania wartościowych i oryginalnych wniosków.

Badania eksperymentalne i numeryczne obejmowały następujące prace badawcze: określenie okna technologicznego procesu WAAM-CMT w przypadku elementów wytwarzanych ze stali 316L, analizę stanu powierzchni próbek na podstawie modeli 3D, ocenę powtarzalności procesu, badanie wpływu wolnego wylotu elektrody i natężenia prądu na geometrię, mikrostrukturę i twardość, badania korozyjne potencjodynamiczne i impedancyjne, ocenę właściwości wytrzymałościowych próbek oraz analizę termomechaniczną MES (w programie Simufact Welding) rozkładu temperatury, odkształceń i naprężeń. Jest to wyjątkowo szeroki zakres prac badawczych i świadczy o dużej determinacji Doktoranta w dążeniu do rozwiązania postawionego problemu naukowego. Na podstawie analizy wyników tych badań Autor rozprawy określił zależności pomiędzy energią liniową, parametrami procesu i geometrią napoin, wpływ mikrostruktury i ferrytu δ na odporność korozyjną oraz wpływ natężenia prądu na anizotropię właściwości mechanicznych. Ustalił również kluczowe parametry zapewniające stabilność i powtarzalność procesu, optymalny zakres natężenia prądu oraz znaczenie kontroli wolnego wylotu elektrody. Najważniejsze wnioski dotyczą krytycznej roli wolnego wylotu elektrody dla jakości powierzchni, możliwości uzyskiwania wysokiej powtarzalności geometrii, korzystniejszych właściwości wytrzymałościowych napoin w porównaniu do materiału rodzimego, specyficznych zależności odporności korozyjnej od mikrostruktury oraz wpływu grubości podłoża i liczby warstw na rozkład naprężeń wewnętrznych. Nadrzędnym wnioskiem

4

wypływającym z pracy jest to, że ostateczny kształt napoin wytwarzanych metodą WAAM zależy od parametrów wpływających na liniową energię napawania oraz od innych czynników, takich jak na przykład długość wolnego wylotu elektrody.

Praca napisana jest z zastosowaniem prawidłowej terminologii spawalniczej. Wyjątek stanowi sformułowanie ze strony 7.: „Stal 316L ma dobre właściwości spawalnicze...”. Termin „właściwości spawalnicze” może być stosowany w odniesieniu do materiałów dodatkowych do spawania, natomiast materiały spawane cechują się właściwością określaną powszechnie jako spawalność. Ponadto Autor na stronie 15. użył zwrotu: „Pierwszy kwartał XXI” – a kwartał to pojęcie dotyczące roku, a nie stulecia.

Na wyróżnienie zasługuje również fakt, że Doktorant przeprowadził wyjątkowo szeroką (rozdział 11 – strony 198-207) dyskusję wyników popartą sformułowaniem dwunastu wniosków. Część podsumowująca rozprawę nie ogranicza się jedynie do skomentowania uzyskanych wyników na tle literatury, ale zawiera również wskazanie kierunków przyszłych badań. Ta ostatnia część jednoznacznie potwierdza bardzo dobrą orientację Doktoranta w aktualnych kierunkach badań prowadzonych zarówno w kraju, jak i za granicą. Tak drobiazgowo przygotowanie zakończenia pracy doktorskiej świadczy o bardzo dobrym przygotowaniu merytorycznym Autora oraz Jego dużym zaangażowaniu i wysokich kwalifikacjach jako pracownika naukowego.

Podsumowując analizę merytoryczną pracy oceniam, że Pan mgr inż. Przemysław Połaski jednoznacznie udowodnił, że jest bardzo dobrze przygotowany metodologicznie do samodzielnego planowania i realizacji badań naukowych.

Uwagi dyskusyjne

Podczas lektury rozprawy nasunęło mi się kilka pytań. Bardzo proszę Doktoranta o odpowiedzi i komentarze do wymienionych zagadnień:

1. Na rysunku 2.1 Doktorant przedstawił wykres „Liczba publikacji w bazie Scopus zawierających akronim WAAM lub jego rozwinięcie w tytule, streszczeniu lub słowach kluczowych”. Czy zaprezentowane dane zostały znormalizowane z uwzględnieniem rosnącego trendu liczby publikacji? Czy Autor może zaproponować metodę skorygowania tych danych?
2. Na stronie 41. Doktorant napisał: „Stal 316L należy do grupy stali austenitycznych o jednofazowej strukturze, wykazującej właściwości paramagnetyczne. Struktura krystaliczna RSC (regularna ściennie centrowana) tej stali jest stabilna w szerokim zakresie temperatury. Stal 316L (1.4404) typowo ma fazową strukturę składającą się z austenitu i ferrytu δ (wysokotemperaturowego).” Bardzo proszę o dodatkowy komentarz odnośnie sprzecznych zapisów: „stali austenitycznych o jednofazowej strukturze” oraz „ma fazową strukturę składającą się z austenitu i ferrytu δ ”.

F. Polaski

3. Na stronie 46. Doktorant napisał: „Równocześnie w tych samych obszarach maleje zawartość niklu, umożliwiając formowanie austenitu.” Bardzo proszę o dodatkowe skomentowanie tego opisu w kontekście austenitotwórczego wpływu niklu jako pierwiastka stopowego.
4. Na stronie 48. Doktorant napisał: „Stopień uczulenia dla stali austenitycznych wyrażony jest parametrem DOS (ang. Degree of Senitization), który w tej grupie stali rośnie wraz ze wzrostem zawartości ferrytu w strukturze.” Bardzo proszę o dodatkowe opisanie parametru DOS, w tym podanie prawidłowej nazwy i sposobu jego określania.
5. Na stronie 50. Doktorant napisał: „Obróbka cieplna - głównie w celu ujednolicenia struktury, najczęściej skutkuje poprawą plastyczności przy spadku wytrzymałości na rozciąganie.”. Bardzo proszę o uzupełnienie tego opisu o rodzaje obróbki cieplnej, które można zastosować w przypadku opisywanych stali odpornych na korozję o strukturze austenitycznej.
6. Na rysunku 7.3 Doktorant pokazał wykres wpływu gęstości siatki na temperaturę maksymalną procesu nie podając jego źródła. Czy jest to opracowanie własne Autora?
7. Na stronie 102. Doktorant napisał: „Kontrola ilości ciepła oraz temperatury międzysięgowej zmniejsza czas wytrzymania materiału w temperaturze 600-900°C, co ogranicza możliwość wydzielania fazy sigma”. Bardzo proszę o wyjaśnienie tego sformułowania i dodatkowy komentarz na tle wykresu zamieszczonego na rysunku 5.3 (strona 46.)
8. Na stronach 105. i 106. Doktorant podaje definicję energii liniowej i opisujący ją wzór zawierający współczynnik sprawności cieplnej procesu. Proszę o uzupełnienie tej części o źródła literaturowe i dodatkowy komentarz w kontekście parametru ilości wprowadzonego ciepła.
9. Na stronie 210. Doktorant sformułował następujący wniosek: „Spośród analizowanych w wytwarzanych próbkach płyt podłoża o grubości zbliżonej do grubości napoiny (w tym przypadku 4 mm) wykazuje znaczną podatność na deformację plastyczną i może stanowić źródło błędów kształtu w uzyskanych wydrukach.” Wniosek w obecnej formie jest niezbyt czytelny, proszę o jego doprecyzowanie.

Moje uwagi w żadnym stopniu nie umniejszają wyróżniającej oceny, na którą w moim głębokim przekonaniu zasługuje recenzowana praca. Mam nadzieję, że powyższe uwagi będą stanowiły podstawę do dyskusji naukowej i okażą się pomocne w kolejnych pracach naukowych Doktoranta.

Wniosek końcowy

Pan mgr inż. Przemysław Połaski zaprezentował w swojej dysertacji spójny i merytorycznie uzasadniony zestaw wyników badań uzyskanych z użyciem nowoczesnych technik, dzięki którym wniósł istotny wkład w rozwój wiedzy o wytwarzaniu przyrostowym (WAAM – CMT) elementów ze stali 316L. Sformułowane wnioski mają wysoką wartość użytkową i mogą być bezpośrednio wykorzystane w praktyce inżynierskiej. W mojej ocenie Doktorant wykazał się zarówno wysokim poziomem wiedzy teoretycznej, jak i umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań naukowych, a przygotowana przez Niego praca doktorska stanowi oryginalne i wartościowe rozwiązanie problemu naukowego.

Opiniowana praca doktorska spełnia w pełni wymagania Ustawy z dnia 20.07.2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz. U. z 2023 r. pozycja 212, z późn. zm.) oraz innych stosownych regulacji prawnych i wnioskuję do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie Pana mgr. inż. Przemysława Połaskiego do publicznej obrony w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.

Ze względu na wysoki poziom opracowania rozprawy, zarówno pod względem naukowym i merytorycznym, jak i redakcyjnym, a także na szeroki zakres badań wykonanych przy użyciu nowoczesnych technik oraz uzyskanie cennych, perspektywicznych rezultatów aplikacyjnych, rekomenduję przyznanie rozprawie doktorskiej Pana mgr. inż. Przemysława Połaskiego wyróżnienia.

Sporządził:



