

dr hab. Marek Kocik  
Ośrodek Techniki Plazmowej i Laserowej  
Instytut Maszyn Przepływowych PAN  
ul. Fiszer 14, 80-952 Gdańsk  
kocik@imp.gda.pl

Gdańsk, 10 czerwca 2022

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra inż. Huberta Danielewskiego

„Wpływ parametrów procesu na profil przetopu wiązką laserową" wykonana na zlecenie Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Świętokrzyskiej w oparciu o pismo Pana Dyrektora dr hab. inż. Sławomira Błasiaka z dnia 31 marca 2022,  
na podstawie otrzymanego egzemplarza rozprawy doktorskiej

### 1. Wstęp

Przedłożona do recenzji rozprawa jest pracą o charakterze eksperymentalnym z elementami modelowania komputerowego i mieści się w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Objętość rozprawy wraz z wykazem literatury, wykazem najważniejszych oznaczeń, spisem rysunków oraz polskim i angielskim streszczeniem obejmuje 174 strony. Wykaz cytowanej literatury zawiera 171 pozycji. Doktorant nie zamieścił dodatkowego spisu swoich publikacji. W spisie wykorzystanej literatury znajduje się ich sześć. Są to publikacje współautorskie, dwie w *Materials* i po jednej w *Technical Transaction*, *Open Engineering*, *Logistyce* i *Biuletynie Instytutu Spawalnictwa*. Rozprawa została podzielona na pięć głównych rozdziałów uzupełnionych podsumowaniem, koncepcją przyszłych badań i wykazem literatury. Tytuł rozprawy *Wpływ parametrów procesu na profil przetopu wiązką laserową* w pełni odpowiada zawartości pracy.

## 2. Uwagi dotyczące tematyki rozprawy, sformułowanego celu i tezy oraz zakresu pracy

Przedmiotem zainteresowania Autora dysertacji jest zastosowanie wiązki laserowej dużej mocy do spawania metali. W szczególności zajmuje go problem takiego doboru parametrów procesu laserowego spawania aby uzyskać pożądany efekt. Uważam, że wybór tematyki jest bardzo aktualny i uzasadniony, biorąc pod uwagę rosnące zainteresowanie metodami laserowego spawania w przemyśle. W szczególności przedsiębiorstwa produkujące zaawansowane technologicznie produkty sięgają po spawanie laserowe, które pozwala na wykonywanie połączeń, które trudno wykonać innymi metodami. Poza tym spawanie laserowe można automatyzować, często w wykorzystaniem robotów przemysłowych co pozwala na wykorzystanie go np. w przemyśle samochodowym. Zrozumienie tych tendencji Autor udowadnia przez swój dobór materiałów do badań. Wykonywał i symulował nie tylko jednoimienne złącza doczołowe ale też złącza doczołowe dwuimienne oraz złącza zakładkowe. Dodatkowo postanowił przeprowadzać proces spawania również wiązką dwuogniskową. Dzięki temu zbliżył się bardzo do wyzwań stawianych przez rzeczywiste przemysłowe zastosowania. Praktyczne problemy jakie pojawiają się w przypadku spawania laserowego to przede wszystkim właściwy dobór parametrów procesu. Właściwy wybór długości fali wiązki laserowej, jej moc, sposób zogniskowania, umiejscowienie ogniska względem obrabianego materiału, prędkość przemieszczania ogniska, obecność i rodzaj gazu osłonowego, to wszystko ma decydujące znaczenie dla otrzymania prawidłowego spawu. I właśnie z problemem właściwego doboru parametrów procesu spawania laserowego Autor postanowił się zmierzyć. W pracy nie pojawia się wprost sformułowana teza rozprawy. Można ją jednak określić następująco: Czy jest możliwe stworzenie algorytmów komputerowych, które przy wszystkich koniecznych uproszczeniach zjawisk fizyko-chemicznych zachodzących podczas procesu spawania laserowego, pozwolą na wyznaczenie optymalnych dla danego przypadku wartości parametrów tego procesu? W tym celu Autor postanawia opracować modele analityczne i numeryczne spawania laserowego, służące do szacowania kształtu przetopu dla jedno i dwuogniskowych układów ogniskowania. Następnie, aby zbliżyć się do zastosowań przemysłowych chce opracować modele do projektowania procesów technologicznych złączy spawanych laserowo oraz do określania wybranych właściwości połączeń.

Zakres pracy obejmuje stworzenie modelu analitycznego dla jednoimiennych złączy doczołowych dla układu jedno i dwuogniskowego. Stworzenie modelu numerycznego dla złączy doczołowych i zakładkowych jedno i dwuimiennych dla układu jedno i dwuogniskowego. Wykonanie próbek testowych do kalibracji modeli oraz wykonanie obszernych badań eksperymentalnych w celu sprawdzenia zgodności przewidywań modeli z rzeczywistymi spoinami.

### 3. Ogólna charakterystyka rozprawy i uwagi merytoryczne

Ogólny przegląd literatury zawarty jest w rozdziale pierwszym i drugim, ale odniesienia do literatury pojawiają się również w pozostałych rozdziałach. Rozdział pierwszy zwięźle wprowadza w zagadnienia analizowane w rozprawie i podaje powody, dla których spawanie laserowe znalazło się w kręgu zainteresowań naukowych Doktoranta. W rozdziale drugim Autor skupia się na wyznaczeniu teoretycznego kształtu profilu przetopienia przy podejściu analitycznym i numerycznym. Podaje także założenia jakie były przyjęte przy symulacji spawania laserowego w środowisku Simufact Welding. Rozdziały pierwszy i drugi są najłabszą stroną rozprawy. Pojawia się tu wiele błędów językowych i stylistycznych. Na przykład na stronie 16 mamy „wzrost jakości wiązki”, stronie 22 i 23 wielokrotnie powtarzany zwrot „poziom jakości” lub na stronie 22 „ilość mocy”. Na stronie 17 natomiast Autor stwierdza, że technika spawania laserowego pozwala na wykonanie połączeń „nawet niemożliwych”. Uciążliwy dla czytelnika jest również brak przecinków lub ich błędne użycie. Co ciekawe, w pozostałych rozdziałach język rozprawy jest na znacznie lepszym poziomie i poza drobnymi literówkami nie można do niego mieć zastrzeżeń. Na rysunku 2 umieszczono „spawanie oporowe”, które nie zostało w tekście opisane przy omawianiu różnych metod spawania. Pominięto za to spawanie plazmowe, które było tam omawiane. Rysunek 3 ilustruje geometrię wiązki gaussowskiej w przewężeniu. Symbole użyte na rysunku do zaznaczenia promienia przewężenia, promienia i kąta rozbieżności wiązki oraz długości Rayleigha nie występują w spisie oznaczeń. Nie ma ich także opisanych w tekście.

Rozdział trzeci zawiera analizę numeryczną spawania laserowego dla układu jedno i dwuogniskowego. W przypadku układu dwuogniskowego ogniska podążają za sobą lub obok siebie. Konfiguracje te Autor nazywa odpowiednio wzdłużną i poprzeczną. Symulacje kształtu spoin, strefy wpływu ciepła oraz powstających w próbkach naprężeń zostały przeprowadzone dla stali niskowęglowej o grubości 6mm dla trzech konfiguracji ogniska. Jako źródło

laserowe przyjęto laser CO<sub>2</sub> o mocy 6 kW dla układu jednoogniskowego lub dwa razy 3 kW dla układu dwuogniskowego. Prędkości przesuwu ogniska ustalono w zakresie 0,6 do 3 m/min. Parametry te są zgodne z parametrami urządzenia laserowego TLC1005 z laserem CO<sub>2</sub> Trumpf TrueFlow 6000, które było używane do badań eksperymentalnych. Symulacje przeprowadzono zmieniając moc wiązki oraz prędkość przemieszczania ogniska laserowego. W rozdziale czwartym porównano wyniki otrzymane w symulacji modelami analitycznymi i numerycznymi z wykonanymi próbnymi przetopami. Wyniki symulacji przedstawiono w formie tabeli z wartościami wymiarów charakterystycznych spoiny. Na pochwałę zasługuje dodatkowy sposób przedstawienia wyników w formie graficznej wizualizacji pozwalającej łatwo stwierdzić różnice w kształcie profilu przetopienia.

Zasadniczą część pracy stanowi rozdział 5. Zawiera on symulacje złączy doczołowych, zakładkowych, jedno- oraz różnoimiennych, wykonane za pomocą opracowanych modeli analitycznych i numerycznych. Obliczone w ten sposób parametry procesu spawania zostały wykorzystane do wykonania złączy próbnych za pomocą urządzenia laserowego TLC1005 z laserem CO<sub>2</sub> Trumpf TrueFlow 6000. Na podstawie wykonanych obliczeń numerycznych przeprowadzono analizę stanu naprężeń i odkształceń złączy spawanych. Dla wykonanych złączy próbnych przeprowadzono badania właściwości mechanicznych i badania metalograficzne, w tym również analizę SEM/EDS. W przypadku spawania złączy doczołowych jednoimiennych otrzymano dobrą zgodność symulacji komputerowej kształtu profilu przetopu z wynikami eksperymentu zarówno dla modelu analitycznego jak i numerycznego z tym, że wartości wymiarów charakterystycznych spoiny obliczone za pomocą modelu numerycznego były nieco bliższe zmierzonym. Dodatkowym ograniczeniem modelu analitycznego w tym względzie jest brak możliwości odwzorowania efektu formowania się spoiny w tym wizualizacji wypukłości lica i kształtu grani spoiny, co jest możliwe dla modelu numerycznego. W przypadku złączy doczołowych różnoimiennych występujące różnice we właściwościach termofizycznych spawanych materiałów spowodowały, że obliczenia metodami analitycznymi nie dały prawidłowych wyników. Autor więc w tym wypadku skupił się jedynie na modelowaniu numerycznym. Łączonymi materiałami była stal nierdzewna 316L i stal niskowęglowa S355J2. Ze względu na różnice w przewodności cieplnej spawanych materiałów symulacje pokazały wyraźną asymetrię w rozkładzie temperatury i kształtu obszaru przetopienia. Uzyskane wyniki doświadczalne są zbieżne z przewidywaniami modelu. Nie ma wprawdzie

w pracy zamieszczonego bezpośredniego porównania kształtu przetopu ale Autor stwierdza zgodność wartości wymiarów charakterystycznych. Stwierdzono również duże różnice w wielkości stref wpływu ciepła dla obu materiałów tak, jak to przewidywał model. Ostatnim, a zarazem najbardziej skomplikowanym przypadkiem opisanym w pracy jest symulacja złączy w konfiguracji zakładkowej. W przypadku złącza jednoimiennego otrzymany doświadczalnie kształt profilu złącza różni się nieznacznie od symulowanego. Podobnie jednak jak w poprzednim przypadku, wartości wymiarów charakterystycznych są w dobrej zgodności. Zmierzona szerokość łoża spoiny złącza wynosi 3,38 mm – symulowana 3,22 mm; szerokość przetopienia na styku łączonych blach wynosi 2,05 mm – symulowana 1,99 mm, natomiast głębokość przetopienia wynosi 4,33 mm – symulowana 4,38 mm. Zaobserwowana różnica w wielkości stref wpływu ciepła w górnej i w dolnej blasze również jest zgodna z symulowanym rozkładem temperatury. Tak jak w poprzednich przypadkach przeprowadzono analizę naprężeń i odkształceń w złączu. Dodatkowo, analiza przemian fazowych w symulacji komputerowej umożliwiła Autorowi określenie struktury materiału po spawaniu. Obliczone wartości twardości dla różnych stref spoiny zostały porównane z wynikami doświadczalnymi. Wartości twardości z symulacji były wyższe od zmierzonych w każdej badanej strefie. Różnice wahały się od 6HV w spoinie do 31HV w strefie wpływu ciepła. W przypadku złączy zakładkowych różnoimiennych przeprowadzono dodatkowo obszerne badania struktury metalograficznej w celu określenia jak sposób ułożenia materiałów podczas spawania laserowego wpływa na właściwości otrzymanych złączy. Na rys. 78 pokazano porównanie przekrojów złączy, jednego z blachą S355J2 na górze i drugiego z blachą 316L na górze. Dodatkowo zaznaczono strefy wybrane do szczegółowej analizy: na granicy wtopienia, obszar pomiędzy spawanymi materiałami, strefa mieszania się materiałów, strefa wpływu ciepła. Przeprowadzono także termo-mechaniczną analizę numeryczną badając stan naprężenia i odkształceń. Stwierdzono wyższe wartości efektywnego odkształcenia plastycznego dla konfiguracji 2, jednak maksymalna wartość naprężeń głównych była większa dla konfiguracji 1. Na podstawie badań metalograficznych stwierdzono istotne różnice w dolnym obszarze spoin. W przypadku konfiguracji 1 struktura była bardziej jednorodna, ale wykazywała większą różnicę w zawartości Cr, Ni i Fe między strefą przetopienia a materiałem rodzimym. Analiza rezultatów wszystkich tych badań skłoniła Autora do rekomendowania konfiguracji 2, w której stal nierdzewna jest umieszczona na górze.

#### 4. Ogólna ocena pracy

Autor podjął się trudnego zadania zrealizowania badań wymagających od niego wiedzy z wielu dziedzin: z optyki, chemii, materiałoznawstwa, termodynamiki i fizyki. Wykazał umiejętność prowadzenia badań eksperymentalnych, potrafił przygotować stanowisko badawcze, dobrać aparaturę i metodę pomiarową, analizować wyniki i formułować wnioski.

Za oryginalne osiągnięcie Doktoranta uznaję:

- opracowanie modelu analitycznego spawania laserowego wiązką pojedynczą i podzieloną,
- opracowanie modelu numerycznego laserowego spawania głębokiego w środowisku Simufact Welding,
- wyznaczenie parametrów procesu spawania laserowego tak, aby osiągnąć zamierzone właściwości złącza,
- obliczenie naprężeń oraz odkształceń powstających w złączu,
- Opracowanie modelu komputerowego symulującego proces konkretne procesy technologiczne, w tym tak skomplikowane jak spawanie złącza zakładkowego różnoimiennego,
- weryfikacja eksperymentalna stworzonych modeli komputerowych.

Staranna praca edytorska (poza rozdziałem 1) oraz wykazana umiejętność Doktoranta w posługiwaniu się wieloma skomplikowanymi urządzeniami badawczymi zasługują na podkreślenie.

#### 5. Podsumowanie

Podsumowując przeprowadzoną opinię o rozprawie doktorskiej Pana mgr inż. Huberta Danielewskiego stwierdzam, że:

- zagadnienie naukowe podjęte przez Doktoranta zostało wybrane i sformułowane prawidłowo,
- cele pracy zostały osiągnięte, a sposób realizacji założonych celów stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego,
- realizując pracę, Doktorant wykazał się samodzielnością i umiejętnością organizowania badań doświadczalnych. Dodatkowo zademonstrował szeroką wiedzę w zakresie wszechstronnego analizowania wyników badań,

- wyniki badań przedstawione w pracy mogą mieć znaczenie praktyczne, zwłaszcza biorąc pod uwagę fakt, że nasz kraj podlega obecnie szybkiej modernizacji przemysłu i zainteresowanie zaawansowanymi technologiami produkcji takimi jak spawanie laserowe stale rośnie.

Stwierdzam, że rozprawa mgra inż. Huberta Danielewskiego spełnia warunki Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki i tym samym pozwala mi to postawić wniosek o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.

*Marek Kocik*

Marek Kocik