

Warszawa, 27 maja 2022 roku.

Prof. dr hab. inż. Andrzej Kolasa  
Aleja Komisji Edukacji Narodowej 83 m. 83  
02-777 Warszawa  
Kolasa.andrzej@wp.pl

## RECENZJA

### rozprawy doktorskiej mgr inż. Huberta Danielewskiego nt. „Wpływ parametrów procesu na profil przetopu wiązką laserową”

#### 1. Podstawa opracowania

Niniejsza recenzja opracowana została na podstawie zlecenia Dyrektora Naukowego dyscypliny Inżynieria Mechaniczna (pismo MAA-510/58/2022) z dn. 31 marca 2022 roku.

#### 2. Uwagi wstępne

Spawanie laserowe, wdrożone do praktyki przemysłowej w latach sześćdziesiątych ubiegłego wieku, jest jednym z najszybciej rozwijających się w ostatnich latach procesów spawalniczych, a sama wiązka laserowa jednym z coraz częściej stosowanych narzędzi technologicznych w różnych procesach obróbki materiałów. Jest to zrozumiałe, jeśli weźmie się pod uwagę właściwości samej wiązki laserowej wynikające z możliwości koncentracji energii nawet do  $10^8 \text{W/cm}^2$ . Takie wysokoenergetyczne źródło energii pozwala na zwiększenie szybkości obróbki materiałów, ograniczenie stref wpływu ciepła, a tym samym ograniczenie powstających naprężeń i ewentualnych odkształceń materiału w miejscu obróbki. Wysoka koncentracja mocy oraz krótkie czasy nagrzewania i chłodzenia materiału mają wpływ na zmiany struktury materiału w miejscu obróbki wynikające z bardzo dużych gradientów temperatur, tworzenia struktur nierównowagowych, a nawet amorficznych. Wszystkie te cechy laserów są obecnie wykorzystywane w praktyce, chociaż wiele procesów fizycznych towarzyszących obróbkom laserowym do dnia dzisiejszego nie znalazło pełnego wyjaśnienia. W procesie spawania laserowego, podobnie jak i w innych procesach spawalniczych, jednym z podstawowych, a może nawet najważniejszych problemów jest jakość wykonywanych połączeń. Ta z kolei uzależniona jest od wielu czynników, z których jednym z najważniejszych, jest właściwy dobór parametrów procesu spawania, do których należą: moc źródła promieniowania, prędkość spawania, kształt i wielkość ogniska wiązki oraz kształt samej wiązki laserowej. Wynikiem doboru wymienionych parametrów jest między innymi głębokość i kształt wtopienia metalu w przekroju poprzecznym złącza. Dlatego też podjęcie badań w tym zakresie przez Doktoranta uważam za aktualne i interesujące. Przedmiotem zainteresowania Doktoranta jest zawarty w tytule rozprawy wpływ parametrów procesu na profil przetopu wiązką laserową. W miejsce kosztownych i czasochłonnych badań praktycznych, co zazwyczaj robi się w takich przypadkach, Doktorant podjął się opracowania modeli analitycznych i numerycznych pozwalających na oszacowanie kształtu przetopienia metalu w zależności od zmiennych parametrów

procesu przy wykorzystaniu wiązki laserowej o jednym i dwu ogniskach. Następnie dokonał analizy porównawczej otrzymanych wyników modelowania z wartościami otrzymanymi eksperymentalnie w rzeczywistych warunkach technologicznych. W ostatnim etapie badań wykonał szereg spawanych złączy próbnych wykorzystując dane z modelowania określając ich jakość i właściwości. Taki tryb postępowania zawarł w założonych celach swoich badań zarówno naukowych jak i użytkowych.

Przyjęcie takiej metodyki postępowania przy realizacji badań zawartych w rozprawie doktorskiej należy ocenić pozytywnie jako oryginalne i nowatorskie podejście do określenia danych przydatnych w opracowaniach technologii spawania laserowego złączy doczołowych i zakładkowych.

### 3. Charakterystyka i ocena rozprawy

W swojej rozprawie doktorskiej mgr inż. Hubert Danielewski podjął próbę opracowania modeli teoretycznych, zarówno analitycznego jak i numerycznego do szacowania kształtu i głębokości przetopienia metalu podczas spawania laserowego jedno i dwuogniskową wiązką przy zastosowaniu odpowiedniego układu optycznego. Model analityczny oparto na równaniach przewodnictwa cieplnego nagrzewanego metalu punktowym i liniowym źródłem ciepła symulującym przekaz energii cieplnej na powierzchni spawanego metalu i wewnątrz utworzonego kanału parowego. Model numeryczny obejmował przestrzenny rozkład ciepła w materiale nagrzewanym ruchomym, objętościowym źródłem w kształcie walca i nierównomiernym rozkładzie energii. Oczywiście modelowanie zarówno analityczne jak i numeryczne wymagało przyjęcia szeregu uproszczeń i przybliżeń, a ich właściwe przyjęcie pozwala na uzyskanie zadowalających wyników.

Układ rozprawy jest przejrzysty, logiczny i typowy dla tego typu opracowań. Po krótkim wstępie, Doktorant sformułował cel oraz zakres pracy. Celem naukowym było opracowanie modeli analitycznych i numerycznych spawania laserowego do szacowania kształtu przetopu dla jedno i dwuogniskowej wiązki laserowej, Celem użytkowym natomiast było opracowanie modeli służących do projektowania technologii spawania laserowego i oraz określania niektórych właściwości wykonywanych złączy. Dla uzyskania założonych celów wyznaczono zakres parametrów mających wpływ na kształt i głębokość przetopienia metalu wiązką laserową, dokonano oceny przydatności modeli analitycznych do szacowania przetopów, opracowano również model numeryczny z wykorzystaniem programu Simufact Welding, a następnie dokonano analizy porównawczej wyników symulacji z danymi uzyskanymi eksperymentalnie w realnych warunkach spawania oraz wykonano szereg złączy próbnych wykorzystując wyniki symulacji. Taki zakres pracy oraz cele badań będące przedmiotem badań uznaję za prawidłowy i spełniający wymogi stawiane rozprawom doktorskim.

Recenzowana rozprawa składa się z pięciu rozdziałów, podsumowania i wniosków z przeprowadzonych badań i analiz oraz, co warto podkreślić, koncepcji dalszych badań. Zawiera również formalne dodatki tj. wykaz stosowanych w pracy oznaczeń, streszczenia w języku polskim i angielskim, spis literatury, spis rysunków. Taką zawartość rozprawy należy uznać za kompletną i prawidłową.

Rozdział pierwszy zatytułowany „Spawanie laserowe – uwagi ogólne” zawiera opracowane na podstawie literatury informacje dotyczące charakterystyki spawania laserowego, krótkiej historii metody, parametrów procesu spawania, jego typowych zastosowań oraz możliwych niezgodności spawalniczych. Dalej opisano metody ogniskowania wiązki laserowej z wykorzystaniem jedno i dwuogniskowych układów optycznych stosowanych do wykonywania złączy doczołowych i zakładkowych. Zabrakło tu chociażby kilku przykładów wykorzystania w praktyce tego typu układów. W

końcowej części rozdziału omówiono zagadnienie modelowania procesu spawania laserowego opartego o rozkłady temperatur w spawanym materiale. Zwrócono uwagę na znaczenie procesu modelowania pozwalającego na skrócenie czasu i ograniczeniu pracochłonności wykonywania wielu prób spawania przy zmiennych parametrach technologicznych oraz badaniu jakości wykonywanych złączy. Wykorzystanie modeli matematycznych pozwala na zawężenie zakresu badań poprzez ograniczenie zakresu parametrów w celu uzyskania zamierzonych efektów.

Doktorant omówił dwa warianty modelowania procesu spawania laserowego, tj. analityczny i numeryczny. Opierając się na danych literaturowych scharakteryzował i uzasadnił dobór obydwu wariantów modelowania wskazując na ich graniczenia i możliwości wykorzystania w praktyce. W tym miejscu warto podkreślić prawidłowy i szeroki dobór literatury przedmiotu zawierający aż 171 w większości aktualnych pozycji opublikowanych w ostatnich kilku latach. Ta część rozprawy nie budzi zastrzeżeń.

Rozdział drugi rozprawy poświęcono sposobom wyznaczenia kształtu i profilu przetopienia metalu poddanego oddziaływaniu różnych źródeł ciepła: punktowego i odcinkowego w modelu analitycznym oraz połączonych dwu źródeł dyskowego i stożkowego w modelu numerycznym. Doktorant szczegółowo analizuje tryb postępowania w obydwu rodzajach modelowania. Modelowanie analityczne oparto na obliczeniach rozkładu temperatur w materiale poddanym oddziaływaniu laserowego źródła energii jedno i dwuogniskowego w strefie spoiny i SWC. Do obliczeń i prezentacji ich wyników użyto program Mathcad. Pomimo szeregu uproszczeń i pominięciu pewnych zjawisk termofizycznych (co zrozumiałe w tego typu postępowaniu) uzyskano rezultaty w postaci profili przetopień zbliżone do tych uzyskiwanych w warunkach rzeczywistych.

W modelu numerycznym wykorzystano program Simufact Welding pozwalający na symulację procesu spawania uwzględniającą oprócz rozkładu ciepła w materiale spawanym ale również zjawiska radiacji i konwekcji oraz oddziaływanie gazu osłonowego. Doktorant i w tym przypadku szczegółowo analizuje warunki modelowania i procedurę rozwiązywania zagadnienia numerycznego z wykorzystaniem MES. Taki sposób postępowania nie budzi zastrzeżeń.

W rozdziale trzecim dokonano analizy numerycznej procesu spawania laserowego dla zogniskowanej punktowo wiązki energii oraz dwu wiązek w układzie wzdłużnym i poprzecznym do kierunku spawania. Wyniki analizy wpływu rodzaju wiązki lasera z uwzględnieniem takich parametrów jak prędkość spawania i moc wiązki na kształt i głębokość przetopienia metalu przedstawiono w postaci graficznej. Dodatkowo przeprowadzono analizę symulacji naprężeń w rozważanych przetopach.

Rozdział czwarty rozprawy zawiera analizą porównawczą wyników modelowania zarówno analitycznego jak i numerycznego z wynikami doświadczenia. W jej wyniku Doktorant stwierdza, że *odpowiednie zaprogramowanie modelu analitycznego lub numerycznego umożliwia osiągnięcie wysokiej zbieżności wyników obliczeń z wartościami otrzymanymi doświadczalnie w szczególności wymiarów obszaru przetopienia. I dalej, że wyniki obliczeń analitycznych ... otrzymywane są relatywnie szybko umożliwiając zwężenie zakresu parametrów spawania dla osiągnięcia spoiny o określonej geometrii. Modele numeryczne umożliwiają otrzymanie zdecydowanie dokładniejszych wyników, a także określenie pewnych właściwości złączy spawanych, jednak wymagają zdecydowanie dłuższego czasu obliczeń oraz specjalistycznych programów typu MES.* Zacytowane tu wnioski sformułowane w rozprawie przez Doktoranta stanowią dobre podsumowanie wykonanych badań potwierdzające jednocześnie zrealizowanie założonych celów badań.

W rozdziale piątym opisano próby spawania złączy doczołowych jedno i różnoimiennych oraz złączy zakładkowych po uprzednim obliczeniu parametrów procesu przy wykorzystaniu modeli symulacyjnych. W wyniku przeprowadzonych prób i badań

stwierdzono przydatność metod analitycznych do wyznaczenia parametrów spawania złączy doczołowych jednoimiennych. Bardziej złożone połączenia – złącza różnoimiennie, zakładkowe itp. wymagają zastosowania do doboru parametrów procesu metod numerycznych.

Pierwszym punktem badań było obliczenie parametrów spawania metodami matematycznymi, a następnie wykonanie próbnych złączy doczołowych, które poddano badaniom metalograficznym. W ich wyniku nie stwierdzono żadnych nieprawidłowości zarówno w złączach jedno jak i różnoimiennych, jakkolwiek wyniki symulacji metodą numeryczną wykazały lepszą korelację profilu przetopienia z wynikiem doświadczenia w porównaniu z metodą analityczną. Przeprowadzona natomiast symulacja rozkładu naprężeń efektywnych i całkowitych odkształceń w złączu różnoimiennym pokazana na rys. 51 i 52 rodzi pewne zastrzeżenia. Różnica w rozkładzie naprężeń w stali węglowej i chromowo-niklowej (rys. 51) nie odpowiada równemu odkształceniu materiałów pokazanemu na rys. 52. Warto byłoby to skomentować.

Kolejnym punktem badań było wyznaczenie parametrów spawania metodą numeryczną, a następnie wykonanie próbnych złączy zakładkowych jedno i różnoimiennych. Metodą symulacyjną wyznaczono najpierw zastaw parametrów spawania złącza jednoimiennego z pełnym przetopieniem obydwu blach i częściowym wtopieniem w blachę dolną. Przeprowadzone badania metalograficzne wykazały wysoką zbieżność wyników symulacji i doświadczenia. Pomiar rozkładu twardości w złączu, wyniki statycznej próby rozciągania, badania mikrostruktury oraz rozkłady głównych pierwiastków stopowych wykazały typowe dla tego rodzaju połączeń wyniki.

Analogiczny tok postępowania przyjęto przy wykonaniu najpierw symulacji a następnie spawania próbnych złączy zakładkowych różnoimiennych blach ze stali węglowej i chromowo-niklowej. Stwierdzono pewne różnice w budowie spoin dla przypadków kiedy górną blachą była stal węglowa, a następnie stal chromowo-niklowa. Lepsze dopasowanie z wynikami symulacji stwierdzono dla złącza z blachą chromowo-niklową usytuowaną na górze. Wyniki pozostałych badań były typowe dla tego typu złączy spawanych.

W zakończeniu rozprawy Autor dokonał podsumowania swoich rozważań, przeprowadzonych prób modelowania analitycznego i numerycznego i ich porównania z wynikami doświadczeń. Wykazał dużą zgodność wyników symulacji z wynikami doświadczalnymi, a tym samym przydatność zaproponowanych modeli do zastosowań praktycznych przy projektowaniu technologii spawania laserowego. Sformułował też plany dalszych badań, których przedmiotem byłoby dalsze doskonalenie modelowania numerycznego procesu spawania laserowego oraz opracowanie sposobów modelowania spawanych laserowo złączy z dodatkiem spoiw.

#### 4. Uwagi szczegółowe

Oprócz wymienionych wcześniej uwag, lektura przedstawionej do recenzji rozprawy prowokuje do zgłoszenia kilku uwag o charakterze krytycznym lub polemicznym. Oto niektóre z nich:

1. Na rys. 3, str. 20 brak oznaczeń użytych symboli (brak ich również w spisie oznaczeń na str.7-8).
2. Nieczytelne oznaczenia na rys. 56 na str. 115.
3. Doktorant nie unikał pewnych niezręczności językowych, np.  
...metody wiązkowe... na str. 13,  
...wymaga obecności próżni... na str. 14,  
...spoin o niespotykanej jakości... na str. 19,  
...dopracowania parametrów procesu... na str.23,

...nieznaczna utrata głębokości przetopu... czy ... bez utraty gęstości mocy... na str.27,  
...Spawanie laserowe ze względu na możliwość wnikania w głąb materiału... na str.29,  
...rozchodzenie się temperatury wokół punktu... na str.45 i 106,  
...modelowanie spawania laserowego dla procesów przemysłowych... na str.74,  
...złącza pachwinowe... na str. 97,  
...wysokość spoiny... na str,100,

4. Tekst rozprawy nie został dokładnie sprawdzony pod względem językowym. Występuje w nim szereg błędów gramatycznych. Należałoby sprawdzić go pod tym względem przed ewentualną publikacją.

## 5. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Huberta Danielewskiego nt. „Wpływ parametrów procesu na profil przetopu wiązką laserową” jest interesującą pracą badawczą o aktualnej tematyce. Doktorant wykazał się umiejętnościami wykorzystywania zarówno aparatu matematycznego, jak i programów komputerowych Simufact Welding i MES do modelowania zjawisk fizycznych. Wykazał też umiejętność prowadzenia badań naukowych, opracowywania ich wyników i formułowania wniosków. Na podkreślenie zasługuje szeroki zakres badań oraz możliwość wdrożenia ich wyników do praktyki inżynierskiej. Pomijając zgłoszone uwagi krytyczne do tekstu rozprawy, łatwe zresztą do poprawienia, zgłaszam wniosek o uznanie recenzowanej rozprawy za wyróżniającą. Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania warunki określone w art. 13 ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach naukowych i tytule w zakresie sztuki oraz wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

