

prof. dr hab. inż. Tomasz Chmielewski  
Politechnika Warszawska  
Wydział Mechaniczny Technologiczny  
ul. Narbutta 85, 02-524 Warszawa  
www.mt.pw.edu.pl

Warszawa, dn. 31.08.2022 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej  
pt.:

„Nowa metodyka wyznaczania energii liniowej spawania”

Autor:  
mgr inż. Michał Macherzyński

Promotor: prof. dr hab. inż. Jacek Słania  
Promotor pomocniczy: dr inż. Kwiryn Wojsyk

Opracowano na zlecenie  
Kierownika Dyscypliny Naukowej  
Inżynieria Mechaniczna  
Politechniki Częstochowskiej  
Pana dr hab. inż. Janusza Szmidla, prof. PCz  
z dnia 05.07.2022 r.

## 1. Uwagi ogólne

Recenzowana rozprawa dotyczy ważnego problemu kwantyfikowania energii liniowej spawania, kształtującej warunki powstawania połączeń spawanych. Podjęty problem badawczy wpisuje się w aktualny nurt naukowy dotyczący efektywności i sprawności energetycznej szeroko rozumianych procesów spajania oraz wpływu ciepła na mikrostrukturę oraz fizyczne i chemiczne właściwości złączy. Kalkulowanie wartości energii liniowej spawania i jej wpływ na właściwości złączy spawanych są od lat przedmiotem prac

naukowych zespołu badaczy z Politechniki Częstochowskiej, a niniejsza rozprawa wpisuje się w tę specjalność i powiększa bogate doświadczenia zespołu.

Praca liczy 126 stron ze spisem treści, spisem literatury oraz streszczeniem w języku polskim i angielskim. Rozprawa składa się z 9 rozdziałów, powiązanych merytorycznie. Zachowano właściwe proporcje pomiędzy zasadniczymi elementami opracowania, które tworzą klasyczny układ dysertacji. Tytuł pracy nawiązuje do jej treści.

Bibliografia obejmuje 110 pozycji literaturowych, w tym dwa współautorskie recenzowane artykuły naukowe Doktoranta w czasopismach bez wyznaczonego IF (współczynnik wpływu). Tylko pięć cytowanych źródeł literaturowych było opublikowanych w ostatnich pięciu latach, a 17 pochodzi z ubiegłego wieku. Spis obejmuje artykuły z czasopism naukowych, normy, materiały konferencyjne i opracowania książkowe.

## 2. Ocena ważności podjętego problemu naukowego

W pracy podjęto problem opracowania efektywnego i uniwersalnego sposobu szacowania rzeczywistej wartości energii liniowej spawania.

W rzeczywistości technologicznej dominuje podejście fenomenologiczne w kwestii oceny jakości złączy spawanych wynikającej z warunków spawania. Powiązanie szeroko rozumianej struktury złącza z wartością energii liniowej spawania jest zasadne. Przyjęty przez Doktoranta główny cel pracy należy uznać za słuszny. Ze względu na różnorodność metod spawania, charakteryzujących się różnymi parametrami cieplnymi, stosowany obecnie wzór na energię liniową spawania (w rozprawie oznaczony nr 3) nie może i nie zapewnia precyzyjnego obliczenia bezwzględnej wartości energii liniowej spawania, służy natomiast do zapewnienia powtarzalności spawania dla określonych warunków technologicznych w tym również określonego gniazda obróbkowego.

Z powyższych względów wybór tematyki uważam za uzasadniony i dobrze ulokowany w perspektywnym obszarze badawczym.

### 3. Ogólna ocena rozprawy

Układ pracy doktorskiej jest klasyczny. We wstępie do rozprawy Autor w zwięzły sposób przedstawił problematykę poruszanego zagadnienia. Rozdział II (który nie został oznaczony numerem) zawiera przegląd literatury skoncentrowany na wpływie warunków procesu spawania na właściwości złącza oraz dotyczy stosowanych obecnie metod określania wartości energii liniowej spawania.

W rozdziale III Autor przedstawił cel pracy, program i zakres badań.

W rozdziale IV opisano zaproponowaną przez Autora metodę szacowania energii liniowej spawania.

Rozdział V zatytułowano „Część badawcza” (nie oznaczono numerem). Zawiera szczegółowy plan badań, opis próbek wzorcowych i kontrolnych oraz przebieg i wyniki badań.

Rozdział VI przedstawia efekty nowej metody wyznaczania energii liniowej spawania.

Rozdział VII poświęcono analizie wyników badań.

W rozdziale VIII zredagowano wnioski z pracy, a w IX określono kierunki dalszych badań.

### 4. Ocena merytoryczna

Po wnikliwym zapoznaniu się z treścią rozprawy stwierdzam, że analiza stanu zagadnienia jest dość uboga i ograniczona do publikacji w większości starszych niż 5 lat i przeważnie o zasięgu lokalnym, plan i metodyka badań mają zbyt wąski zakres, realizacja badań, dobór aparatury naukowo-badawczej oraz opracowanie wyników, prezentują dobry poziom merytoryczny.

Koncepcja nowej metody bazująca na badaniach niszczących ma ograniczone możliwości aplikacyjne i podobnie jak podczas kwalifikowania technologii spawania (jako procesu specjalnego) polega na ocenie skutków.

Oparcie koncepcji nowej metody szacowania rzeczywistej energii liniowej spawania wyłącznie na pomiarach zasięgu strefy topienia i SWC jest ryzykowne, ponieważ ciepło zaangażowane do pokonania bariery energetycznej spajania powoduje również przemiany mikrostruktury (reorientacji kryształów) i zmianę właściwości fizycznych w materiale rodzimym, które nie są rejestrowane zastosowaną w pracy metodą mikroskopii świetlnej. W zależności od mechanizmów umocnienia materiału podstawowego (roztworowy, wydzieleniowy, zgniotem) i ich udziału, reakcja materiału rodzimego na cykl cieplny spajania jest różna.

W mojej ocenie program badań powinien być rozszerzony o badania struktury krystalicznej i budowy fazowej w szerokim paśmie materiału rodzimego poza SWC (wskazaną podczas badań na mikroskopie optycznym) i zawierać co najmniej określenie reorientacji kryształów i tekstury metodą EBSD (Electron Backscatter Diffraction) oraz rozkładów właściwości fizycznych w złączu i materiale rodzimym metodą IIT (Instrumented Indentation Test).

Zaproponowana metoda określenia rzeczywistej wartości energii liniowej spawania nie znajduje zastosowania do metod wysokoenergetycznych (np. 15) o dużej gęstości mocy, powodującej powstawanie kanału parowego, który w porównaniu do metod przewodnościowego nagrzewania (135, 131, 141) jest procesem quasiadiabatycznym, powodującym bardzo wąską strefę wpływu ciepła przy dużej wartości energii liniowej spawania, ponieważ duża część energii zużywana jest na parowanie metalu spoiny z pominięciem przejścia przez fazę ciekłą, w takim przypadku wiązanie pola przekroju poprzecznego objętości

przetopionej oraz zasięgu SWC z wartością energii liniowej jest bardzo ryzykowne.

Kwestionowanie zasadności stosowania wzoru na energię liniową dla złączy punktowych nie ma sensu i nie może być uzasadnieniem dla celu pracy.

Eksperyment i warunki przeprowadzonych w pracy prób spawalniczych powinny być precyzyjnie opisane ze względu na konieczną w badaniach naukowych odtwarzalność eksperymentu i wykluczenie przypadkowości uzyskanych wyników. Nie określono: wartości natężenia przepływu gazu osłonowego jako czynnika chłodzącego, średnicy dyszy gazowej, warunków stygnięcia złącza oraz brak powtarzalnego dla wszystkich prób miejsca pobrania preparatu do badań metalograficznych (gradient temperatury i jej wartość w obszarach charakterystycznych dla złącza zmienia się na całej długości tak wąskich próbek jakie stosowano w pracy). Poprzednia uwaga dotyczy masy i wymiarów próbek (H1 i H2 rys. 16 i Tab. VIII), które wydają się mieć zbyt małą pojemność cieplną do stosowanych warunków spawania.

Użycie w tytule i stosowanie w treści rozprawy określenia „metodyka” wobec zaproponowanej faktycznie nowej metody uważam za nieuzasadnione.

Za największe, oryginalne osiągnięcia naukowe Doktoranta uważam zaproponowanie koncepcji powiązania wartości energii liniowej spawania ze skutkami metalurgicznym w złączu, która może być drogowskazem dla dalszych badań w środowisku naukowym spawalników.

## 5. Uwagi do pracy

Generalnie, praca napisana jest niezłe z zastosowaniem właściwej terminologii, jednak Autor nie uniknął licznych błędów merytorycznych, redakcyjnych i językowych, sprawiających wrażenie pośpiechu bez należytej korekty językowej i merytorycznej, np.:

- Autor nadużywa liczby mnogiej dla takich rzeczowników jak: energia, temperatura, stal, co w języku potocznym uchodzi, jednak w rozprawie naukowej powinno się pisać np. o różnych wartościach temperatury, a nie o kilku temperaturach, różnych gatunkach stali, a nie różnych stalach itd.,

- Autor wymiennie używa określeń nie będących synonimami, proces i metoda w kontekście spawania,

- w tabeli I wpisano maksymalną temperaturę w łuku MIG  $\sim 20000$  °C, co wydaje się być pomyłką pisarską,

- porównanie wprost temperatury łuku i temperatury topnienia materiałów spawanych w kontekście warunków stapienia, bez uwzględnienia poziomu mocy źródła ciepła, gęstości mocy, przewodności i pojemności cieplnej materiału podstawowego jest nieuprawnione,

- Autor wymiennie stosuje określenie stygnięcie i chłodzenie (str. 7; 12), które mają różne znaczenie, zwłaszcza w kontekście niniejszej rozprawy,

- ilość ciepła doprowadzana do złącza (np. str. 8 i wielu innych miejscach pracy) jest z punktu widzenia fizyki określeniem precyzyjnym (jednostką ciepła jest J lub cal), a stosowanie tego określenia wymiennie z energią liniową spawania (jednostka J/mm), która opisuje ilość ciepła przypadającą na jednostkę długości złącza jest błędem. Jeszcze większym jest ich porównywanie w kontekście warunków termodynamicznych.

- str. 9 użyto określenia wielkość energii liniowej, winno być wartość energii liniowej,

- str. 11 określenie palnik spawalniczy powinno być stosowane w przypadku płomieniowych metod spawania, w łukowych stosowane jest określenie uchwyt elektrodowy (ewentualnie plazmotron dla metody 15),

- str. 12. przy pierwszym użyciu skrótu CMT powinno się rozwinąć go do pełnej nazwy Cold Metal Transfer,

- na stronie 13 autor pisze, że skurcz podczas stygnięcia generuje naprężenia spawalnicze, co przecież jest warunkowane utwierdzeniem elementu, kiedy element ma swobodę odkształcania naprężenie może nie wystąpić,

- w pracy występuje szereg zdań niezrozumiałych lub niefortunnie sformułowanych np.: str. 4 „... dlaczego procesy spawania nie pozwalają uzyskać powtarzalnych wyników w postaci prawidłowego i równomiernego przetopienia materiału spawanego?”; str. 16 „Procedura kwalifikowania technologii spawania jest niezaprzeczalnie jak najbardziej konieczna, aczkolwiek posiada pewne nieścisłości...”; str. 28 „Elektroda jest ostrzona na ostro, a jej kąt wierzchołkowy powinien mieścić się w granicach  $30 \div 60^\circ$ ”; str. 30 „Poduszki gazowe, np. z argonu wpływają na odprowadzanie ciepła ze złącza podobnie jak powietrze, dlatego ich zastosowanie ma taki sam wpływ na doprowadzone ciepło, jak gdyby ich nie było”; str. 68 „Zgodnie z wcześniejszymi analizami, najbardziej miarodajnym i pożądanym wskaźnikiem odpowiadającym efektywnemu, niezbędnemu wprowadzeniu ciepła jest poprzeczne pole powierzchni wtopienia”; str. 108 „Aby jednak wykonać je w prawidłowy sposób należało uprzednio poddać analizie zmienne zasadnicze, które zostały już przebadane i opisane w literaturze. Jak pokazano w niniejszej pracy, zmienne te wywierają łącznie ogromny wpływ na rzeczywistą ilość ciepła doprowadzanego do złącza bądź napoiny, co przekłada się na ich właściwości” (Choć w większości wymienionych niefortunnych sformułowań domyślam się intencji Autora, nie akceptuję takich błędów, ze względu na niekwestionowaną konieczność precyzyjnego formułowania myśli w dysertacji doktorskiej)

- stosowane w treści rozprawy określenie termopara jest żargonem,

- w pracy stosowane jest określenie „kształt geometryczny”, które wydaje się redundantnym połączeniem wyrazowych,

- przedstawione w tab. XVII wartości  $P_S$ ,  $P_W$ ,  $P_P$ ,  $P_{FW}$  i  $P_N$  są statystycznie niewiarygodne, w sytuacji pomiarów wielkości fizycznych (na potrzeby badań naukowych) obarczonych w sposób naturalny błędami. Brakuje choćby prostego ujęcia statystycznego, np. wskazania średniej arytmetycznej z wartości kilku pomiarów i odchylenia standardowego od wartości średniej będącego miarą zmienności obserwowanych wyników,

- na str. 61 Autor stwierdził „Materiał do badań powinien zatem charakteryzować się niskim równoważnikiem węgla, a co za tym idzie bardzo dobrą spawalnością ...” A przecież niski równoważnik węgla nie oznacza bezwarunkowo dobrej spawalności. Przykład, stal umacniana zgniotem i wydzieleniowo (tzw. termomechaniczna) lub stal niestopowa o grubości  $>25$  mm,

- w tab. XVIII wartość współczynnika próbki wzorcowej  $b'$  określono z dokładnością pięciu miejsc po przecinku, co jest nieuzasadnione wobec rozdzielczości pomiarowej zastosowanej metody pomiaru,

- we wniosku 4. (str. 113) Autor z jednej strony stwierdza, że zaproponowana metoda umożliwia oszacowanie ilości ciepła doprowadzanego do złącza, a dalej w tym samym zdaniu, że umożliwia obliczanie z większą dokładnością bądź pewnością.

- wniosek 5. (str. 114) jest zupełnie nieuprawniony, nie przeprowadzono badań związanych z jego treścią,

Inne drobne usterki redakcyjne zaznaczyłem w tekście i przekazałem autorowi do rozważenia.

Poniżej wymieniono uwagi o charakterze dyskusyjnym z prośbą do Autora rozprawy o ustosunkowanie się:

1. Na stronie 67 Autor napisał, że „miejsce zglądu zostało uprzednio wyznaczone w trakcie spawania w miejscu, gdzie jarzenie łuku



wykazywało się największą stabilnością ...” Jakie przyjęto kryteria oceny tego stanu i jak je rejestrowano?

2. Dlaczego nie oszacowano błędu pomiaru analizowanych powierzchni przekroju złączy? Zarówno linia wtopienia jak i profil podłużny lica spoiny mają kształt nieregularny, co sugeruje znaczną zmienność wyników pomiaru. Jakie jest uzasadnienie podawania wartości  $P_S$ ,  $P_W$ ,  $P_P$ ,  $P_{FW}$  i  $P_N$  z dokładnością do trzeciego miejsca po przecinku w sytuacji wykonania pojedynczego pomiaru.
3. Spoiny nie mają płaskiego profilu wzdłużnego, a linia wtopienia też nie jest linią prostą. Warunki cieplne na początku i na końcu złącza znacznie się różnią. Jak, zatem wskazać reprezentatywny przekrój złącza?
4. W jaki sposób i z jaką dokładnością wyznaczano położenie linii granicznych na przekrojach złączy spawanych w tab. XI-XVI?

## 5. Podsumowanie i wnioski końcowe

Uważam, że recenzowana rozprawa prezentuje ogólnie dobry poziom merytoryczny, zawiera element nowości i wnosi wkład do dyskusji nad określeniem rzeczywistej wartości energii liniowej spawania.

Ponadto stwierdzam, że Autor wykazał się wystarczającą wiedzą, umiejętnością planowania i realizacji badawczych prac naukowych, umiejętnością oceny i interpretacji uzyskanych wyników.

W związku z powyższym uważam, że rozprawa doktorska opracowana przez Pana mgr. inż. Michała Macherzyńskiego pt. „Nowa metodyka wyznaczania energii liniowej spawania” spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy prawa i może być dopuszczona do publicznej obrony w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.

