

Prof. dr hab. inż. Jerzy Łabanowski  
Politechnika Gdańska  
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa  
Instytut Technologii Maszyn i Materiałów  
ul. G. Narutowicza 11/12  
80-233 Gdańsk  
jerzy.labanowski@pg.edu.pl

## RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Macherzyńskiego  
pt. "Nowa metodyka wyznaczania energii liniowej spawania"**

zrealizowanej pod kierunkiem

Promotora prof. dr hab. inż. Jacka Słani

Promotora pomocniczego dr inż. Kwiryna Wojsyka

Podstawą opracowania niniejszej recenzji jest pismo Kierownika Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Częstochowskiej Pana dr hab. inż. Janusza Szmidła, prof. P.Cz. z dnia 09.05.2022r. nr R-WIMiI-510-4/19. Podstawę prawną wykonania recenzji stanowi Ustawa o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz Stopniach i Tytule w zakresie Sztuki z dnia 14.03.2003r. (Dz. U. poz. 595 z 2003 r. z późniejszymi zmianami).

### 1. Zakres i aktualność tematu rozprawy

Przedmiotem badań i analiz w recenzowanej pracy doktorskiej są zagadnienia związane z doborem parametrów spawania gwarantujących uzyskanie złączy o określonym poziomie jakości i akceptowalnych właściwościach mechanicznych. Spawanie jest specjalnym procesem technologicznym, czyli takim, którego rezultat trudno jest zweryfikować w sposób nieniszczący w trakcie wytwarzania produktu. Natomiast wytworzony w wyniku procesu specjalnego produkt może ujawnić swoje wady w trakcie użytkowania. A zatem proces specjalny powinien być kontrolowany, aby nie dopuścić do ewentualnych wad produktu. W przypadku wykonywania złączy spawanych niezwykle istotna jest ilość wprowadzonego ciepła, którego powszechnie używanym miernikiem jest energia liniowa spawania ( $E_L$ ). Dobór wartości energii liniowej spawania jest jednym z najczęściej dyskutowanych tematów w branży spawalniczej. Dyskusje dotyczą zarówno

metody obliczania tej wielkości jak również jej minimalnych lub maksymalnych wartości w odniesieniu do rozważanego procesu technologicznego spawania. Precyzyjny dobór energii liniowej spawania ma kluczowe znaczenie dla poprawności wykonania złączy spawanych zwłaszcza w nowoczesnych drobnoziarnistych stalach o podwyższonej i wysokiej wytrzymałości, stalach ulepszonych cieplnie oraz stalach odpornych na korozję.

Doktorant przywiązuje dużą wagę do metody obliczania energii liniowej spawania. Krytycznie ocenia zależność obliczania ilości wprowadzonego ciepła podczas spawania jako iloczynu napięcia i prądu spawania dzielonego przez prędkość spawania z uwzględnieniem współczynnika efektywności termicznej podaną w normie PN-EN 1011-1. Jest przekonany, iż dokładniejsze zrozumienie istoty energii liniowej oraz czynników wpływających na jej wartość pozwoli na bardziej precyzyjny dobór parametrów spawania, co będzie miało bezpośrednie przełożenie na jakość i ekonomiczny aspekt wykonania złączy.

Podjęte badania są nowatorskie, ponieważ ujmują szereg czynników, które dotychczas nie były uwzględniane. Doktorant zakłada, że energia liniowa jest ściśle związana z uzyskanym efektem spawania w postaci przetopienia materiału i stąd poprzeczne pole powierzchni wtopienia jest bezpośrednim odwzorowaniem energii wprowadzonej do złącza. Nowa metodyka obliczania  $E_L$  sprowadza się do określenia zależności pomiędzy energią zużywaną w trakcie procesu spawania na stopienie materiałów rodzimego oraz dodatkowego, a uzyskanym poprzecznym polem powierzchni spoiny. Głównym celem badań było określenie współczynnika  $\beta$  – zależności pomiędzy  $E_L$  a przekrojem spoiny. W tym celu Doktorant wykonał serię spoin wzorcowych w takich warunkach, aby wpływ czynników zewnętrznych wpływających na proces był ograniczony do minimum. W ten sposób można szacować rzeczywistą energię liniową spawania złącza wykonanego dowolną metodą łukową. Uważam, że wybór tematyki pracy doktorskiej jest jak najbardziej trafny, aktualny i w pełni uzasadniony.

Rozważane zagadnienia dotyczą technologii wytwarzania i z tego powodu osiągnięcia naukowe wykazane w tej pracy przyczyniają się do rozwoju dyscypliny inżynieria mechaniczna.

## 2. Charakterystyka szczegółowa rozprawy doktorskiej

Rozprawa o objętości 126 stron zawiera 26 rysunków, 36 tabel i składa się z trzech zasadniczych części. Obejmują one: analizę stanu zagadnienia w świetle literatury, opis badań własnych wraz z analizą wyników i wnioskami oraz wykaz literatury.

Wykaz literatury zawiera 110 pozycji. Są to głównie artykuły z czasopism i podręczniki, a także 32 odnośniki do norm, materiałów firm i stron internetowych. Zdecydowana większość przywołanych artykułów z czasopism jest aktualna, wydana w ostatnich 10-15 latach. W wykazie zostały przytoczone 2 artykuły z czasopism recenzowanych, w których Doktorant jest współautorem, a artykuły są związane bezpośrednio z realizacją pracy doktorskiej.

Część studialna pracy jest integralnie związana z jej tematem i została oparta na szerokim przeglądzie pozycji literaturowych dotyczących energii liniowej spawania i szacowania ilości ciepła doprowadzonego do złącza podczas spawania. W rozdziale 2.1.4 Doktorant charakteryzuje zmienne zasadnicze procesu spawania, które nie są brane pod uwagę podczas obliczania energii liniowej spawania, a mają wpływ na ostateczną wartość energii wprowadzonej do złącza, co z kolei wpływa na geometrię spoiny i strukturę materiału.

Na podstawie danych z literatury Doktorant przedstawia ciekawe zestawienie 112 złączy spawanych wskazując wartości energii liniowych spawania oraz odpowiadające im pola powierzchni wtopienia  $P_w$  (Tabela VIII). Na rys. 11 przedstawia zależność wartości  $E_L$  i  $P_w$  wykazując brak korelacji pomiędzy tymi wielkościami. Moje zastrzeżenie do tego opracowania budzi włączenie do analizy 25 złączy wykonanych metodą laserową. W przypadku procesów spawania skoncentrowanymi źródłami energii, takimi jak spawanie laserowe lub wiązką elektronów, łuk elektryczny nie jest wytwarzany między źródłem ciepła a przedmiotem obrabianym. Współczynnik efektywności termicznej procesu może się różnić w zależności od intensywności mocy wiązki i konfiguracji złącza. W spawaniu laserowym współczynnik efektywności termicznej nie jest uwzględniony w obliczeniach energii liniowej (uwzględnia się moc wiązki lasera). Wpływ ciepła doprowadzonego na szybkość chłodzenia w procesach spawania skoncentrowanymi źródłami energii nie jest taki sam jak w przypadku procesów spawania łukowego ze względu na różnice w kształcie spoin. Z tego względu, w moim odczuciu, prezentowane rozważania dotyczące energii liniowej spawania powinny być ograniczone do spawania łukowego metodami MIG/MAG, FCAW, TIG, SAW, PAW.

W podsumowaniu przeglądu literatury Doktorant słusznie stwierdza, że należy dążyć do bardziej precyzyjnego określania energii liniowej spawania. Natomiast stwierdzenie Doktoranta (str. 52) „... wzór (3) [dotyczy wzoru na obliczanie  $E_L$ ] przestaje pełnić jakąkolwiek rolę” jest zbyt daleko idące.

Autor nie przedstawia hipotezy naukowej pracy ograniczając się do wskazania głównego celu pracy: „*Celem pracy jest opracowanie efektywnego sposobu szacowania rzeczywistej energii liniowej spawania lub napawania wykonanego dowolną metodą złącza spawanego lub napoiny*”. Cel pracy jest jasno i jednoznacznie sformułowany, natomiast uważam, że w pracy naukowej przyczyniającej się do rozwoju dyscypliny hipoteza naukowa powinna zostać sformułowana.

Dla realizacji celów pracy Doktorant przyjął program składający się z dwóch zasadniczych etapów. W etapie I wykonał spawane próbki wzorcowe w celu wyznaczenia współczynnika  $\beta$  opisującego zależność pomiędzy energią liniową spawania a przekrojem spoiny. W etapie II wykonał spawane próbki kontrolne w warunkach przemysłowych w celu weryfikacji słuszności wyznaczonego współczynnika  $\beta$ .

Poszukiwania wartości współczynnika  $\beta$  oparte było na wykonaniu serii spoin wzorcowych w takich warunkach, aby wpływ czynników zewnętrznych wpływających na proces był ograniczony do minimum. Dyplomant wykonał 6 złączy teowych ze spoiną pachwinową ze stali S355 stosując metodę spawania 135 (MAG). Złącza były zróżnicowane w zakresie wysokości spoiny, grubości spawanych elementów oraz prądu spawania. Rejestrowane były parametry spawania w celu określenia energii liniowej  $E_L$ . Następnie ze złączy wykonano próbki w celu przeprowadzenia pomiarów powierzchni przekroju spoin. W tym celu Doktorant opracował metodykę pomiarów opartą o program Inventor Professional firmy Autodesk. Wyniki badań pozwoliły na wyznaczenia zależności liniowej pomiędzy  $E_L$  a poprzecznym polem powierzchni spoiny  $P_s$ . Doktorant otrzymał równanie o wysokim współczynniku determinacji i na tej podstawie wyznaczył współczynnik  $\beta$  próbki wzorcowej. To z kolei pozwoliło na zaproponowanie wzoru na obliczanie energii liniowej spawania według współczynnika  $\beta$ ,  $E_{L\beta} = \beta \times P_s$ .

W kolejnym etapie wykonano złącza kontrolne w warunkach odmiennych od wzorcowych. Zastosowano spawanie standardową metodą MAG, w odmianach Rapid i Tandem wykonując złącza ze spoinami pachwinowymi i czołowymi oraz napoiny. Przeprowadzone badania przekrojów spoin wykazały niewielkie rozbieżności w wartościach energii spawania  $E_L$  i  $E_{L\beta}$ , dla standardowej metody MAG natomiast duże dla metody MAG Tandem oraz dla napoin. Ten fakt może świadczyć o dużych stratach ciepła w procesie spawania, które dotychczas nie były uwzględniane przy obliczaniu energii liniowej  $E_L$ .

W tej części pracy Doktorant wykonał szeroki zakres badań gwarantujący uzyskanie szczegółowych informacji na temat wpływu warunków spawania na wielkość energii zużytej na wykonanie złącza. Praktyczne stosowanie tych badań wymagało od Doktoranta odpowiednich kompetencji i umiejętności badawczych. Dużą zaletą opracowania rozdziałów 5.2 i 5.3 pracy jest staranne udokumentowanie wyników badań. Przedstawione przez Doktoranta wysokiej jakości zdjęcia makrostruktur badanych złączy stanowią dowód wykonania badań, mają istotny aspekt poznawczy oraz mogą stanowić dobry przykład dydaktyczny.

W rozdziałach 6 i 7 pracy mgr inż. Michał Macherzyński przedstawił analizę i podsumowanie materiału badawczego. Konfrontuje wyniki uzyskane w badaniach eksperymentalnych z informacjami zaczerpniętymi z literatury. W tej części pracy Autor wykazał umiejętność syntetycznego ujęcia teoretycznych i praktycznych aspektów badań własnych. Wnioski (rozdział 8) sformułowane na podstawie otrzymanych wyników badań i ich dyskusji są przedstawione w sposób jasny i wskazują, że postawione cele pracy zostały osiągnięte.

### 3. Ocena rozprawy doktorskiej

W pracy można wyróżnić osiągnięcia naukowe wpisujące się w rozwój dyscypliny inżynieria mechaniczna oraz osiągnięcia użytkowe, do których zaliczam:

- Opracowanie nowej metody obliczania energii liniowej spawania wyznaczonej na podstawie energii zużytej na przetopienie materiału rodzimego oraz dodatkowego.
- Wyznaczenie zależności pomiędzy energią liniową spawania a poprzecznym polem powierzchni wtopienia dla typowych złączy występujących w konstrukcjach spawanych.
- Udowodnienie słuszności założeń nowej metody szacowania energii liniowej spawania poprzez praktyczną weryfikację wyników na złączach przemysłowych.

Oceniając pozytywnie rozprawę doktorską kieruję do Doktoranta pytania i uwagi do dyskusji.

- Proszę uzasadnić praktyczne znaczenie nowo opracowanej metody szacowania energii liniowej spawania z punktu widzenia inżyniera planującego proces technologiczny spawania.

- Proszę o określenie zakresu istotności współczynnika próbki wzorcowej  $\beta$ . Czy do każdej metody spawania należy wyznaczyć osobno współczynnik  $\beta$ ?
- Jaki był cel wyznaczania energii liniowej spawania poszczególnych stref spoiny z osobna?

Tekst pracy napisany jest bardzo starannie i w związku z tym znalazłem tylko nieliczne uchybienia:

- Str. 109, błąd w przywołaniu numeru rysunku – jest rys.18 powinien być rys. 19b.
- Str. 110, błędy w przywołaniu numerów wzorów – 13 i 14 powinno być 14 i 15.

Pod względem edytorskim rozprawę oceniam bardzo dobrze. Jest napisana poprawnym i jasnym językiem. Dokumentacja wyników badań przedstawiona w postaci tabel, rysunków i zdjęć jest szczegółowa i starannie opracowana.

#### 4. Podsumowanie i wniosek końcowy

Przedstawioną rozprawę doktorską uważam za interesującą i wartościową. Pan mgr inż. Michał Macherzyński zrealizował zadanie badawcze będące przedmiotem rozprawy. Wykazał umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych oraz opracowania i analizy uzyskanych wyników. Przedstawione w rozprawie wnioski są dobrze udokumentowane. Biorąc pod uwagę aktualność tematyki pracy, klarowne sformułowanie celów pracy oraz ich osiągnięcie na drodze zaplanowanych i przeprowadzonych badań, dobrze oceniam przedstawioną rozprawę doktorską.

W podsumowaniu recenzji stwierdzam, że przedstawiona przez mgr inż. Michała Macherzyńskiego praca pt. „Nowa metodyka wyznaczania energii liniowej spawania” spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w Ustawie o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz Stopniach i Tytule w zakresie Sztuki z dnia 14.03.2003 r. i wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżyniera Mechaniczna Politechniki Częstochowskiej o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

