

prof. dr hab. inż. Tomasz Chmielewski  
Instytut Technik Wytwarzania  
Wydział Mechaniczny Technologiczny  
Politechnika Warszawska  
ul. Narbutta 85, 02-524 Warszawa  
e-mail: tomasz.chmielewski@pw.edu.pl

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Bartłomieja Kucel

pt.

„Analiza wpływu parametrów technologicznych spawania cienkościennych elementów,  
stosowanych w budowie silnika lotniczego, na minimalizację ich deformacji”

Promotor dr hab. inż. Marek Mróz, prof. uczelni

Promotor pomocniczy dr inż. Magdalena Radoń

Opiekun pomocniczy mgr inż. Bartłomiej Pikul

## 1. Podstawa opracowania

Niniejsza recenzja została wykonana na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej.

## 2. Tytuł rozprawy doktorskiej - aktualność podjętego tematu

Praca dotyczy nowej koncepcji procesu technologicznego spawania cienkościennych elementów silników lotniczych, w której usprawnienie procesu spawania polega na opracowaniu innowacyjnego oprzyrządowania technologicznego procesu ograniczającego odkształcenia spawalnicze oraz opracowaniu nowych warunków technologicznych w zakresie parametrów procesu spawania. Podjęte zagadnienie jest

aktualne z naukowego punktu widzenia i posiada również znaczny walor użytkowy w postaci zrealizowanego wdrożenia w warunkach przemysłowych w firmie MB Aerospace opracowanej technologii spawania cienkościennych elementów silników lotniczych, ukierunkowanego na ograniczenie odkształceń spawalniczych.

Praca jest właściwie ułożona w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna posiada również wątki inżynierii materiałowej.

### 3. Charakterystyka i ocena rozprawy - ocena metodyczna (ocena układu rozprawy doktorskiej, ocena zastosowanego piśmiennictwa)

W swojej rozprawie doktorskiej Pan mgr inż. Bartłomiej Kucel przeprowadził szeroką analizę stanu literatury w zakresie nowoczesnych materiałów stosowanych w budowie silników lotniczych (rozdział 1.), omówiono zastosowanie i warunki obróbki wysokostopowych gatunków stali i stopów niklu. W rozdziale 2. omówiono aktualnie stosowane metody spawania podczas budowy części lotniczych, szczególnie TIG (ang. Tungsten Inert Gas), EBW (ang. Electron Beam Welding) i spawanie laserowe w kilku jego odmianach. W rozdziale 3. szeroko poruszono aspekt stanu naprężenia i odkształcenia węzłów spawanych. Omówiono stosowane w przemyśle metody redukcji odkształceń spawalniczych.

W rozdziale 4. przeprowadzono analizę stanu zagadnienia oraz postawiono tezę brzmiącą: „Opracowanie technologii spawania cienkościennych komponentów ze stali 17-4 PH i ze stopu Inconel 718, opartej o nowe rozwiązanie konstrukcyjne oprzyrządowania spawalniczego oraz dobór parametrów technologicznych półautomatycznego spawania metodą TIG wraz z zastosowaną obróbką cieplną po procesie spawania, zapewni minimalizację ich deformacji spawalniczych oraz obniży koszty i podniesie jakość prac związanych z montażem silnika lotniczego”

Badania własne opisano w rozdziale 5. Właściwie określono cel i ustalono program badań, który jest rozległy i zawiera szereg składowych, w tym: dobór materiału do badań i określenie geometrii próbek, dobór oprzyrządowania technologicznego i konfiguracja

stanowiska spawalniczego, wykonanie złączy spawanych poddanych badaniom, pomiary geometrii złączy spawanych, badania nieniszczące złączy, obróbka cieplna próbek, pomiary geometrii złączy spawanych po obróbce cieplnej, analiza odkształceń spawanych złączy próbných, badania niszczące złączy spawanych, badania metalograficzne mikrostruktury złączy spawanych, pomiary twardości obszarów charakterystycznych w złączach spawanych, określenie właściwości mechanicznych złączy spawanych.

Układ rozprawy doktorskiej jest klasyczny i ma prawidłową budowę. Rozprawa podzielona jest na 7 rozdziałów numerowanych i części nienumerowane jak: streszczenie, w języku polskim i angielskim i spis literatury.

Opracowanie liczy 161 stron. Spis literatury obejmuje 117 pozycji. Przegląd piśmiennictwa jest wykonany starannie. Cytowane pozycje literaturowe są aktualne i obejmują artykuły z czasopism naukowych, standardy, materiały konferencyjne i opracowania książkowe. Większość pozycji literaturowych stanowią aktualne publikacje z międzynarodowego obiegu literatury, w tym spis zawiera jedną współautorską publikację naukową Doktoranta ściśle powiązaną z treścią doktoratu. W przeprowadzonych badaniach racjonalnie zaplanowano eksperyment i prawidłowo dobrano metody badawcze.

W rozdziale 7. Autor podsumowuje badania i stawia wnioski.

Koncepcja badań doświadczalnych została sformułowana przez Doktoranta poprawnie. Realizację badań oceniam pozytywnie z kilkoma uwagami wymienionymi w dalszej części opinii. Eksperymentalna część rozprawy jest przejrzysta, lecz nie jest wolna od niedoskonałości, jednak zawiera szereg wartościowych wyników i informacji naukowych i praktycznych. Doceniam trafnie przyjęty zakres eksperymentu. oraz dużą liczbę przeprowadzonych badań. Forma prezentowania wyników jest właściwa i czytelna.

## 4. Najważniejsze uwagi ogólne i szczegółowe

Generalnie, praca napisana jest dobrym językiem. Autor nie uniknął jednak błędów redakcyjnych, językowych oraz niestety merytorycznych, sprawiających wrażenie pisania w pośpiechu bez uważnej korekty autorskiej (uwagi redakcyjne zaznaczyłem w treści rozprawy i przekazałem autorowi), np.:

1. Autor stosuje różne skale i jednostki temperatury F, K i °C i długości (mm, cale i centymetry), co istotnie utrudnia porównywanie wartości właściwości fizycznych. Nawet na jednym wykresie używane są cale i centymetry jednocześnie.
2. Autor wymiennie stosuje jednostki naprężenia SI i imperialne.
3. W kilku miejscach występuje tekst niewłaściwie przetłumaczony z języka angielskiego. (np. ang. „technology” nie znaczy technologia, tylko technika).
4. Sformułowanie zastosowane w tezie pracy „półautomatyczne spawanie jest żargonem warsztatowym”.
5. Str. 23 „Spawanie TIG można prowadzić bardzo niskimi prądami ...”.
6. Podczas pierwszego użycia skrótów powinno się je rozwinąć (EBW i LBW str. 24 czy VT).
7. Str. 28 „*Additive Manufacturing*” nie tłumaczy się na język polski jako produkcja przyrostowa.
8. Str. 28 przykład zdania sformułowanego niejednoznacznie „GE jest w stanie łączyć różne materiały w swoich AM proces”
9. Str. 32 zdanie bez sensu „W wielu zastosowaniach lotniczych właściwości zmęczeniowe spoiny są krytycznymi kryteriami projektowymi.”
10. Na stronie 32 Autor napisał „W wielu zastosowaniach lotniczych właściwości zmęczeniowe spoiny są krytycznymi kryteriami projektowymi. Z tego powodu projektanci prawie zawsze określają, że lico spoiny i grań spoiny powinny być wypukłe” wypukłe lico i grań są skutecznymi karbami geometrycznymi prowokującymi pęknięcia podczas w pracy w warunkach zmęczeniowych.

11. Na stronie 48 błędnie założono, że zmniejszenie naprężeń wewnętrznych bezwzględnie prowadzi do zmniejszenia deformacji węzłów spawanych.
12. Błędnie utożsamiano energię liniową z ilością wprowadzonego ciepła i określenia te stosowano wymiennie, nie bez winy jest tu błędne oficjalne tłumaczenia normy na język polski i ten grzech pierworodny towarzyszy wielu opracowaniom spawalniczym. Ciepło to ta część energii wewnętrznej, którą obiekt o wyższej energii przekazuje temu o niższej. Jednostką ciepła, tak jak każdego rodzaju energii, w układzie SI jest dżul (J). Ilość wprowadzonego ciepła można wyrazić w dżulach. Natomiast „energia liniowa spawania”, opisuje, ile energii skonsumowano na długość spoiny podczas jej wytwarzania i ma wymiar J/m.
13. W wielu miejscach pracy są sformułowania obarczone niewłaściwym tłumaczeniem z języka angielskiego, np. fraza na str. 34 „metali macierzystych”.
14. W opisach rysunków stosowany jest język polski i angielski jednocześnie lub alternatywnie.
15. Str. 60 zdanie niezrozumiałe „Jest to precyzyjne źródło prądu inwertorowego ...”
16. Str. 63 „d) prąd impulsu termo szybki ...”
17. Str. 78 „Zmierzono wysokość każdego złącza na płycie grafitowej...”
18. Na rysunkach od 92 do 98 przedstawiono szereg zarejestrowanych profili pomiarowych bez komentarza.
19. Str. 130 „Analiza szerokości obszaru wtopienia wskazuje na dużą różnicę pomiędzy złem spawanym ręcznie...”

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

1. Na str. 77 pokazano na rys. 73 rozmieszczenie linii pomiarowych A; B; C. Jaka była ich relacja geometryczna względem spoiny w kierunku linii tworzącej rury

(spoiny łączącej zwinięte pasy blachy). Zależność ta ma istotne znaczenie dla przestrzennej deformacji rury.

2. W tab. 13 przedstawiono wyniki pomiarów wysokości złącza. Wartość ta naturalnie wykazuje zmienność w dużym zakresie. Jak wykonano pomiar w kontekście zapewnienia statystycznej wiarygodności zarejestrowanych wartości?
3. Po obróbce cieplnej złączy spawanych przeprowadzono ponowne pomiary profilu złącza. W jaki sposób zapewniono powtarzalność miejsca wykonania pomiaru, upoważniającą do porównywania wyników z obu etapów pomiarów?
4. Bazowanie próbek do pomiaru kąta deformacji przedstawionego schematycznie na rys. 125, wydają się być niejednoznaczne. Proszę o komentarz.
5. Złącza spawane wykazują znaczną zmienność w zakresie geometrii (oraz właściwości mechanicznych i metalograficznych), co powoduje konieczność wykonywania pomiarów wielkości fizycznych (charakteryzujących złącza) na dostatecznie dużej próbie statystycznej, umożliwiającej określenie wartości średniej i odchylenia standardowego od wartości średniej. W przypadku pomiarów geometrii spoin, które z natury charakteryzujących się znaczną zmiennością wyników, testy wykonano na niskiej próbie, 1 pomiar na punkt (jak wynika z Tab. 16). Proszę o ustosunkowanie się autora w kontekście porównania do obrazu powierzchni spoin o znacznej zmienności jej szerokości jak na rys. 83 i 87 (a szczególnie na rysunku 129). Podobna uwaga jest do pomiarów twardości przedstawionych na rys. 164, 165 i 166, i wyników badań wytrzymałościowych tab. 30, których statystyczna wiarygodność wydają się nieadekwatnie niska do wymagań stawianych pracy naukowej.
6. Na rys. 127 i w tab. 25 przedstawiono porównanie wybranych właściwości złączy i energii liniowej spawania, spoin wykonanych ręcznie i automatycznie. Porównanie to jest nieuprawnione. Ręczne spawanie złączy nie zapewnia należytego poziomu powtarzalności procesu z punktu widzenia badań naukowych. Nie jest możliwe dostatecznie powtarzalne odtworzenie eksperymentu, a właściwości złączy i wyniki pomiarów właściwości fizycznych złączy mogą być losowe, a przez to statystycznie niewiarygodne, pomimo nawet

wysokiego doświadczenia spawacza. Podczas ręcznego spawania fluktuują wartości parametrów procesu spawania kształtujących cykl cieplny (np. prędkość spawania, odległość uchwytu elektrodowego od powierzchni przedmiotu obrabianego, orientacja uchwytu elektrodowego, nieliniowa/losowa trajektoria spawania).

7. Na rysunku 154 pokazano porównanie „obszaru wtopienia” w złączy spawanym ręcznie i półautomatycznie, w jaki sposób zabezpieczono reprezentatywność porównywanych obszarów?
8. Wnioski numer 4 i 5 (w ramach wniosków szczegółowych i końcowych) wydają się oczywiste. Proszę o komentarz.

## 5. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Bartłomieja Kucela nt. „Analiza wpływu parametrów technologicznych spawania cienkościennych elementów, stosowanych w budowie silnika lotniczego, na minimalizację ich deformacji” jest interesującą dysertacją o aktualnej tematyce. Praca doktorska reprezentuje dyscyplinę naukową inżynieria mechaniczna.

Podjęty w rozprawie temat jest ważny i wnosi wkład w rozwój dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna, a dodatkowo wnosi wkład merytoryczny do systemu zapewnienia jakości w spawaniu w kwestii kontroli odkształceń spawalniczych.

Doktorant wykonał badania w warunkach przemysłowych i laboratoryjnych, a opracowaną technologię wdrożono do przemysłu. Pozyskana nowa wiedza pozytywnie rozwija stan techniki w zakresie przemysłu metalowego, szczególnie na potrzeby konstrukcji lotniczych.

Doktorant wykazał się umiejętnością planowania i wykonywania badań oraz analizy merytorycznej uzyskanych wyników. Na wysoką ocenę zasługują badania metalograficzne w ramach, których na wysokim poziomie jakości obrazów ujawniono mikrostrukturę obszarów charakterystycznych badanych złączy spawanych.

Autor dowiódł poprawności postawionej tezy i osiągnął cele naukowe i technologiczne pracy. Całość recenzowanej rozprawy w pełni potwierdza wystarczającą wiedzę teoretyczną Doktoranta oraz umiejętność prowadzenia pracy naukowo-badawczej.

Uważam, że recenzowana rozprawa prezentuje dobry poziom merytoryczny, zawiera element nowości i wnosi wkład do dyskusji nad rozwojem techniki ograniczania odkształceń złączy spawanych.

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

Podsumowując stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r., poz. 1668, z późn. zm.) i wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony.



Warszawa, 15 lutego 2025 r