



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

dr hab. inż. Dariusz Fydrych, prof. uczelni
Instytut Technologii Maszyn i Materiałów
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa
Politechnika Gdańska
ul. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk

Gdańsk, 31 stycznia 2025

RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Bartłomieja Kucela pt.:

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

wykonanej pod opieką promotora Pana dr. hab. inż. Marka Mroza, prof. PRz,
promotor pomocniczej Pani dr inż. Magdaleny Radoń,
oraz opiekuna pomocniczego Pana mgr. inż. Bartłomieja Pikula
opracowana na zlecenie Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna
Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza
z dnia 27 listopada 2024 r.

Wprowadzenie

Podczas spawania materiałów występuje w nich szereg zjawisk, które są wynikiem silnej interakcji między polem cieplnym, zmianami właściwości mechanicznych oraz strukturą złączy spawanych. W niehomogenicznym obszarze strefy wpływu ciepła zachodzą przemiany alotropowe skutkujące znacznymi zmianami właściwości fizykochemicznych materiału. Oddziaływanie cieplne wywołuje naprężenia i odkształcenia, które istotnie wpływają na stabilność wymiarową oraz w konsekwencji trwałość konstrukcji spawanej. Możliwość przewidywania tych zjawisk w celu zapewnienia zgodności wymiarów konstrukcji z normami technicznymi ma kluczowe znaczenie dla praktyki przemysłowej. Z analizy literatury wynika, że obecnie badania koncentrują się na analizie procesów cieplnych i ich wpływie na powstawanie odkształceń w konstrukcjach spawanych. Szczególny nacisk kładzie się na metody oceny, przewidywania i minimalizowania negatywnych skutków cieplnych w celu poprawy stabilności wymiarowej i trwałości złączy spawanych. Zagadnienia te są niezwykle ważne w przypadku elementów cienkościennych, które są eksploatowane w niekorzystnych warunkach, co dotyczy będących przedmiotem rozprawy silników lotniczych. Nie mam wątpliwości, że Pan mgr inż. Bartłomiej Kucel właściwie wybrał przedmiot, cel i zakres pracy. Jej tematyka jest aktualna, a wyniki podobnych badań cieszą się dużym zainteresowaniem wśród naukowców i inżynierów z przemysłu. Zagadnienia będące przedmiotem recenzowanej rozprawy są od wielu lat jednym

z najsilniej rozwijających się trendów badawczych w spawalnictwie. Z merytorycznej analizy zawartości pracy wynika, że wpisuje się ona w dziedzinę Inżynieria Mechaniczna.

Charakterystyka i ocena formalna rozprawy

Recenzowana praca doktorska Pana mgr. inż. Bartłomieja Kucela jest skomponowana klarownie, zgodnie z układem IMRaD, a jej treść jest przedstawiona w logicznie uzasadnionym ciągu przyczynowo-skutkowym, co czyni lekturę przystępną i przyjemną w odbiorze.

Rozprawa składa się ze spisu treści, wprowadzenia, 7 rozdziałów zamieszczonych na 172 stronach, które obejmują opis stanu zagadnienia w świetle literatury, badania własne, wnioski i podsumowanie, streszczenie w języku polskim i angielskim, a także spis literatury i spisy rysunków i tabel. Praca nie zawiera załączników.

W rozdziale pierwszym Doktorant omówił kluczowe materiały stosowane w budowie silników lotniczych: stale wysokostopowe i stopy niklu, podkreślając ich wysoką wytrzymałość i odporność na ekstremalne warunki występujące podczas eksploatacji w silnikach lotniczych. Skupił się na różnicach występujących między materiałami używanymi w sekcjach zimnych i gorących silników oraz ich wpływie na wydajność i trwałość konstrukcji. W drugim rozdziale Autor opisał procesy spawania, które są stosowane w przemyśle lotniczym racjonalnie koncentrując się na metodach TIG, EBW i LBW. W kolejnym rozdziale przeanalizował proces powstawania naprężeń i odkształceń spawalniczych, które mogą znacząco obniżyć jakość złączy i powodować wzrost kosztów wytwarzania konstrukcji spawanych. Następnie Doktorant opisał techniki symulacji oraz metody redukcji odkształceń. Treść rozdziału czwartego obejmuje podsumowanie stanu wiedzy dotyczącego rozpatrywanych zagadnień na tle światowej literatury oraz sformułowanie tezy pracy. Uważam, że ten fragment pracy jest bardzo wartościowy, ponieważ płynnie i swobodnie wprowadza czytelnika do następujących po nim rozdziałów zawierających badania własne zrealizowane przez Doktoranta. W rozdziale piątym Autor opisał szczegółowo program badań, dobór materiałów, oprzyrządowanie spawalnicze oraz realizację prac badawczych. Dwa kolejne rozdziały obejmują wnioski i podsumowanie pracy. Spis literatury obejmuje 117 pozycji źródłowych, w tym jedną pracę, której Doktorant jest współautorem i jest przygotowany poprawnie, z pełnym opisem bibliograficznym, chociaż znalazłem kilka nieścisłości, które jednak nie utrudniają zidentyfikowania źródeł. Są one ułożone w kolejności cytowania w treści rozprawy. Przytaczane źródła są różnorodne i merytorycznie uzasadnione, spis obejmuje aktualne polsko- i anglojęzyczne artykuły z czasopism naukowych, materiałów konferencyjnych i inne publikacje z całego świata. Zamieszczone na stronach 149-152 streszczenia byłyby bardziej informatywne, gdyby Doktorant podał w nim najważniejsze wyniki ilościowe.

Rozprawa została przygotowana z dbałością o szczegóły zarówno pod względem formalnym, jak i redakcyjnym, co sprawia, że jest dobrze zorganizowana i czytelna. Zastosowanie prawidłowej terminologii technicznej, szczególnie w kontekście inżynierii materiałowej oraz

spawalnictwa, dodatkowo podnosi jakość merytoryczną rozprawy. Podczas lektury zauważyłem jedynie sporadyczne literówki, niewielkie uchybienia interpunkcyjne, a także kilkanaście innych drobnych błędów formalnych, które jednak nie mają większego wpływu na ogólną ocenę pracy, jej zrozumienie i odbiór. Poniżej wymieniam uwagi w tym zakresie mając nadzieję, że w przyszłych pracach Doktorant będzie unikał tych mankamentów:

- Skróty powinny być wyjaśnione tylko przy pierwszym użyciu, a w pracy zdarzają się powtórzenia, np. Tungsten Inert Gas,
- Doktorant często zastępuje polskie terminy obco brzmiącymi synonimami: np. kompresja (zamiast: sprężanie), deformacja (zamiast: odkształcenie), „integralność strukturalna” (w tym przypadku trudniej znaleźć polski odpowiednik: wytrzymałość, niezawodność, jakość, spójność strukturalna), „polaryzacja (zamiast: biegunowość), „kondycja materiału” (zamiast: stan materiału).
- „nisko temperaturowe” - w języku polskim przymiotniki z przedrostkiem „nisko-” zapisuje się łącznie.
- Strona 13: „Ni2Al, Ni3Ti, Ni3TiAl, Ni3Al, Ni3Nb, Ni3Cu” – błędny zapis symboli związków chemicznych
- Strona 26: „w latach 50tych XX wieku” – prawidłowy zapis to: „w latach 50. XX wieku”. Analogicznie należało zapisać „Lata 60-ąte XX wieku” (strony 30 i 31).
- Rysunki 5, 16 i np. 56-58 mają niską jakość.
- Strona 61: „stało prądowej” (powinno być: „stałoprądowej”)
- Strona 62: „Zaprojektowane do obsługi kilku dodatkowych osi, które można programować i sterować”. To jest równoważnik zdania, który należało zamienić na zdanie.
- Rysunki 64 i 65 (strona 71 i 72) mają błąd w podpisie elementów wskazanych na rysunku 66.
- Strona 125: błędne wskazanie rysunku 149 jako 143.
- Rysunki 170-173 – opis osi Y należało przetłumaczyć na język polski.
- Tabele 21 i 22 nie są wymienione w tekście.
- Źródła literaturowe: [54] [107] nie są zacytowane w treści rozprawy, [112] jest zacytowane zbyt późno, a [39] jest zacytowane zbyt wcześnie.

Pomimo tych uwag, w podsumowaniu aspektów: redakcyjnego, graficznego i językowego, chciałbym podkreślić dobry poziom przygotowania formalnego pracy.

Ocena merytoryczna rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Bartłomieja Kucela została zrealizowana w ramach programu „Doktorat wdrożeniowy” i spełnia jego założenia. Pod względem merytorycznym treść pracy odpowiada jej tytułowi i uważam ją za bardzo wartościową pod względem naukowym i praktycznym. Autor poprawnie zrealizował uprzednio założone zadania badawcze: przeprowadził szeroki przegląd literatury, zaproponował odpowiednie do osiągnięcia celu pracy badania, przeprowadził zaawansowane i wzajemnie uzupełniające się badania eksperymentalne ukierunkowane na zweryfikowanie skuteczności różnych metod zmniejszania

odkształceń spawalniczych cienkościennych elementów silnika lotniczego wykonanych ze stali 17-4 PH i stopu niklu Inconel 718.

Zakres prac badawczych został w ogólny sposób przedstawiony na schemacie pokazanym na rysunku 67 (strona 74), co znacząco poprawia czytelność raportu z badań. Systematyczny przegląd literatury oraz własne doświadczenie Autora w zastosowaniu procesów spawania do wykonywania złączy z badanych materiałów pozwoliły Mu na sformułowanie tezy następującej postaci (strona 55):

„Opracowanie technologii spawania cienkościennych komponentów wykonanych ze stali 17-4 PH i ze stopu Inconel 718, opartej na nowym rozwiązaniu konstrukcyjnym oprzyrządowania spawalniczego oraz doborze parametrów technologicznych automatycznego 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.” Tak sformułowaną tezę oceniam jako prawidłową i szczególnie związaną z celami programu „Doktorat wdrożeniowy”.

Cele naukowe pracy zostały podane na początku rozdziału 5:

- „• określenie wpływu oprzyrządowania, parametrów automatycznego spawania metodą TIG oraz zabiegu obróbki cieplnej na deformacje spawalnicze cienkościennych elementów ze stali 17-4 PH i ze stopu Inconel 718 stosowanych w budowie silników lotniczych,
- określenie wpływu parametrów technologicznych automatycznego spawania metodą TIG na mikrostrukturę i właściwości użytkowe złączy spawanych cienkościennych elementów ze stali 17-4 PH i ze stopu Inconel 718.”

Doktorant sformułował również cel użyteczny, który jest istotny z punktu widzenia rozprawy o charakterze wdrożeniowym:

„Celem użytecznym pracy było opracowanie metody redukcji deformacji spawalniczych złączy spawanych wytwarzanych w firmie MB Aerospace, uwzględniającej rozwiązanie konstrukcyjne oprzyrządowania, parametry technologiczne spawania metodą TIG oraz obróbkę cieplną cienkościennych elementów silników lotniczych, celem obniżenia kosztów produkcji poprzez zmniejszenie ryzyka wystąpienia niezgodności wymiarowych na etapie obróbki mechanicznej części, a także zmniejszenie czasu obróbki mechanicznej.”

Zadania badawcze przedstawione w pracy można podzielić na następujące etapy:

1. Dobór materiału i kształtu próbek – wybór odpowiednich materiałów (stal 17-4 PH i stop niklu Inconel 718) oraz ich geometrii do celów badawczych.
2. Oprzyrządowanie i stanowisko do automatycznego spawania metodą TIG – projektowanie i wykorzystanie oprzyrządowania spawalniczego.
3. Wykonanie próbnych złączy spawanych – przygotowanie próbek i przeprowadzenie procesów spawania w kontrolowanych warunkach.

4. Pomiary złączy próbných po spawaniu – analiza odkształceń i jakości złączy spawanych.
5. Badania nieniszczące złączy spawanych
6. Obróbka cieplna próbných złączy spawanych – dobór parametrów obróbki cieplnej i poddanie spawanych próbek procesom przesycania i starzenia.
7. Pomiary próbných złączy spawanych po obróbce cieplnej – analiza odkształceń i jakości złączy spawanych.
8. Analiza odkształceń próbných złączy spawanych: analiza stopnia odchylenia profilu od kształtu nominalnego, analiza odkształcenia kąowego, analiza skurczu poprzecznego.
9. Badania niszczące złączy spawanych: badanie metalograficzne, pomiary twardości, badania właściwości mechanicznych.

Na podstawie analizy wyników tych prac Autor pozytywnie zweryfikował tezę pracy. Moim zdaniem, za najważniejsze osiągnięcie Doktoranta wynikające z lektury recenzowanej rozprawy należy uznać opis złożonego wpływu trzech metod: zastosowania przyrządów spawalniczych, doboru parametrów spawania połączonego z zautomatyzowaniem procesu TIG oraz obróbki cieplnej na zmniejszenie odkształceń spawalniczych. Oczywiste ograniczenia obszaru zastosowania zaproponowanego rozwiązania stanowią: aspekt materiałowy (dla dwóch gatunków stopów żelaza i niklu, co również determinuje rodzaj i zakres parametrów obróbki cieplnej) oraz aspekt technologiczno-konstrukcyjny wynikający z kształtu i wymiarów próbek, rodzaju spoiny, typu złącza, pozycji spawania itd.

W zakresie oceny merytorycznej stwierdziłem następujące drobne uchybienia:

1. Autor stosuje w całej pracy termin: „stal pół austenityczna”. W polskim piśmiennictwie naukowym taki termin nie występuje. Rozumiem, że jest to tłumaczenie angielskiej nazwy „semi-austenitic steel”.
2. Występujący w pracy potoczny termin: „spawarka” powinien być zastąpiony (moim zdaniem) określeniem: „urządzenie spawalnicze” albo: „spawalnicze źródło prądu” w zależności od kontekstu.
3. Strona 10: „Są to głównie stale chromowo-niklowe oraz chromowo-niklowo-magnezowe.” Powinno być: „stale [...] chromowo-niklowo-molibdenowe”.
4. Strona 25: „Materiał dodatkowy w postaci prętów jest podawany ręcznie lub automatycznie.” Oczywiście materiał dodatkowy do spawania metodą TIG może być podawany automatycznie, ale dotyczy to drutu, a nie pręta.
5. Charakterystyka procesów spawania przedstawiona w rozdziale 2. całkowicie pomija ich wady, które stanowią ważne kryterium doboru procesów do określonych zastosowań.
6. Rys. 20 ma błędny podpis: „Spawanie automatyczne obudowy łożyska przedniego”. W rzeczywistości pokazano na nim: „obudowę łożyska przedniego turbosprężarki”.

silnika turbo wentylatorowego do samolotu pasażerskiego Airbus A380”, co zostało wskazane w tekście na stronie 29.

7. Rysunek 46 (strona 56) przedstawiający „wycięte pasy blachy” nie jest potrzebny, ponieważ nie dostarcza ważnych informacji, nawet wymiarów próbek, gdyż nie podano skali. Podobnie rysunki 62 i 169 nie są konieczne. Przypuszczam, że ich zamieszczenie wynika z troski Doktoranta o jak najlepsze udokumentowanie przebiegu prac badawczych. Jednak w takim przypadku można było je zamieścić
8. w załączniku.
9. Rysunek 65 (strona 71): termin „dekiel” nie jest formalnie poprawny. Lepiej brzmi: „pokrywa”.
10. Praca jest obszerna, a uważam, że można było ją skrócić bez utraty informacji usuwając rysunki z wykresami, które są powtórzone na rysunkach 111-117.

Wyniki przedstawionych w rozprawie badań oraz sformułowane przez Autora wnioski wskazują na skuteczność zaproponowanych rozwiązań w minimalizacji odkształceń i poprawie jakości złączy spawanych. Wdrożenie nowych technologii spawania w warunkach przemysłowych pozwoliło na obniżenie kosztów produkcji i zwiększenie niezawodności elementów silników lotniczych. Praca ma istotne znaczenie dla przemysłu lotniczego, a jej wyniki mogą być użyteczne również w innych sektorach wymagających wykonywania podobnych złączy. W moim odczuciu recenzowana dysertacja stanowi wkład w rozwój inżynierii mechanicznej i nowoczesnych technologii spawalniczych, a Pan mgr inż. Bartłomiej Kucel wykazał samodzielność i dobre przygotowanie do planowania i realizacji prac o charakterze naukowo-badawczym.

Uwagi dyskusyjne

Podczas lektury dysertacji nasunęło mi się kilka pytań. Bardzo proszę Autora o odpowiedzi i komentarze do wymienionych zagadnień:

1. Co oznacza skrót „AMS”, który nie został wyjaśniony w pracy?
2. Strona 29: Proszę o dodatkowe wyjaśnienie zdania: „General Electric Aviation wprowadził na rynek silnik do samolotów komercyjnych GE9X, który jest produkowany ze znaczną zawartością dodatków.” O jakie dodatki chodzi?
3. Z czego wynikały różne liczby próbek wykonanych dla różnych badanych konfiguracji? Pokazano to na rysunku 67.
4. Tabela 12 (strony 76 i 77) zawiera kilka nieścisłości: błędne zapisy jednostki czasu: „sec” i „sek”, a także: „L/min”, niejasne terminy: „Natężenie przepływu gazu na uchwyt”, „Natężenie przepływu gazu na grani”, „Czas napełniania grani przed spawaniem” „wysoki puls” i „niski puls”. Proszę o komentarz.

5. Proszę o uszczegółowienie pojęcia energii liniowej, które jest w różny sposób przedstawiane w pracy.
6. Które próbki poddano obróbce cieplnej? Nie jest to jasno wskazane w treści pracy.

Powyższe uwagi nie umniejszają dobrej oceny, na którą w moim głębokim przekonaniu, zasługuje recenzowana praca. Mam nadzieję, że powyższe uwagi będą stanowiły podstawę do naukowej dyskusji i okażą się pomocne w dalszych pracach naukowych Doktoranta.

Wniosek końcowy

Pan mgr inż. Bartłomiej Kucel w swojej pracy doktorskiej przedstawił spójne i dobrze uzasadnione wyniki badań oraz analiz, przeprowadzonych przy użyciu prawidłowo dobranych oraz nowoczesnych metod badawczych. Sformułował wnioski dotyczące wpływu parametrów technologicznych na deformacje i jakość złączy spawanych oraz, co jest szczególnie ważne w przypadku doktoratu wdrożeniowego, wskazał praktyczne zastosowanie wyników badań w przemyśle lotniczym, a także możliwość dalszej optymalizacji procesów.

Z analizy treści recenzowanej rozprawy wynika, że Doktorant potwierdził wysoki poziom ogólnej wiedzy teoretycznej oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia prac naukowych, a przedstawiona przez Niego praca doktorska jest oryginalnym rozwiązaniem problemu naukowego.

Opiniowana praca doktorska spełnia w pełni wymagania Ustawy z dnia 20.07.2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz. U. z 2023 r. pozycja 212, z późn. zm.) oraz innych stosownych regulacji prawnych i wnioskuję do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza o dopuszczenie Pana mgr. inż. Bartłomieja Kucela do publicznej obrony w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.

Sporządził:

Dariusz Fydyk

