



dr hab. inż. Andrzej Kubit, prof. PRz  
Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza  
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa  
al. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów

Rzeszów, 29.11.2023 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Tomasza Zadrożnego  
pt.: „Minimalizacja odkształceń cieplnych w wyniku inteligentnej optymalizacji  
rozmieszczenia punktów mocowań w obszarze komponentu spawanego”**

**1. Podstawa formalna opracowania recenzji oraz ogólna charakterystyka rozprawy**

Recenzję wykonano w oparciu o zlecenie Rady Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej Politechniki Śląskiej, wyrażone w piśmie RDIME.512.27.2023 Przewodniczącej ww. Rady Dyscypliny Pani Prof. dr hab. inż. Ewy Majchrzak. W piśmie tym z dnia 27 września 2023 roku powołano moją osobę na recenzenta rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Tomasza Zadrożnego pt.: „Minimalizacja odkształceń cieplnych w wyniku inteligentnej optymalizacji rozmieszczenia punktów mocowań w obszarze komponentu spawanego”. Promotorem pracy jest Pan dr hab. inż. Mirosław Szczepanik, prof. PŚ.

Analizowana rozprawa doktorska napisana została na 129 stronach maszynopisu zawierających stronę tytułową, spis treści, wprowadzenie, spis treści, wprowadzenie, część zasadniczą, zakończenie, bibliografię, a także streszczenie w językach polskim oraz angielskim.

**2. Ocena wartości naukowej i aktualności podjętej tematyki**

Zjawisko związane z odkształceniami spawalniczymi szczególnie w odniesieniu do struktur cienkościennych jest istotnym problemem technologicznym. Usztywnione struktury cienkościenne są powszechnie stosowane w budowie środków transportu ze względu na możliwość przenoszenia obciążeń eksploatacyjnych przy zachowaniu relatywnie niskiej masy. Sztywność takich struktur

Biuro Dziekana

wpłynęło dnia 02.12.2023  
RDJMe/3291/511/2023  
nr ..... zał. ....



zapewniają elementy usztywniające takie jak wręgi, podłużnice, czy żebra. Zazwyczaj łączy się je poprzez spawanie, nitowanie, klejenie, zgrzewanie. Technologie związane z generowaniem dużej ilości ciepła (spawanie, zgrzewanie) wywołują niepożądane efekty deformacji. To z kolei wymaga pracochłonnych czynności związanych z prostowaniem konstrukcji. Wszelkie prace badawcze mające na celu możliwość niwelowania takich odkształceń są istotne i ważne dla rozwoju technologii wytwarzania cienkościennych struktur usztywnionych. W pracy przedstawiono autorską propozycję zastosowania metod numerycznych do minimalizacji odkształceń powstałych na skutek procesu spawania poprzez optymalizację ustawień przyrządów spawalniczych. W założeniu metoda ta umożliwiałaby autonomiczny dobór punktów utwierdzenia konstrukcji podczas operacji spawania. Jest to niezwykle istotne z punktu widzenia powszechnej automatyzacji w przemyśle. To ważne zagadnienie w kontekście tzw. czwartej rewolucji przemysłowej, gdzie w założeniu sztuczna inteligencja ma optymalizować procesy technologiczne i autonomicznie dostosowywać je do potrzeb rynkowych.

W związku z powyższym uważam, że podjęta w pracy tematyka jest ważna, z kolei autorski system optymalizacji rozmieszczenia podpór w przyrządach spawalniczych niesie w sobie elementy nowości naukowej. Dodatkowo przedstawienie wyników badań w odniesieniu do operacji spawania rzeczywistej konstrukcji świadczy o możliwościach aplikacyjnych uzyskanych rezultatów.

### **3. Ocena doboru źródeł literatury i ich analizy**

Doktorant przeanalizował literaturę obejmującą 80 pozycji. Bibliografia jest przede wszystkim anglojęzyczna i w przeważającej większości są to prace opublikowane w ostatnich 10 latach, co świadczy o aktualności analizowanych źródeł. Przy czym 20% pozycji bibliografii to opracowania wydane przed 2000 rokiem, jednak ich przytoczenie jest uzasadnione.

Przegląd literatury jest bardzo istotnym elementem rozprawy doktorskiej, który ma jednoznaczną rolę. Przede wszystkim ta część pracy powinna stanowić krytyczną dyskusję na temat dotychczasowych dokonań w danym zakresie badań. Analiza literatury ma w założeniu prowadzić do określonych wniosków oraz wykazania luki w określonym obszarze nauki. Bezpośrednio z przeglądu literatury powinien wynikać cel pracy będący próbą wypełnienia objętego rozważaniami obszaru wiedzy. Wreszcie konsekwencją rozeznania aktualnego stanu wiedzy powinna być postawiona hipoteza pracy oraz jej zakres.

W przypadku ocenianej rozprawy doktorskiej nie przestrzegano tych zasad, przegląd literatury w głównej mierze zawiera wyjaśnienie podstawowych zagadnień poruszanych w pracy, postawiono tu przede wszystkim na przedstawienie teorii. Owszem zaprezentowano problemy związane z



odkształceniami na skutek spawania struktur cienkościennych, dokonano przeglądu metod niwelowania tych odkształceń. Opisano wreszcie prawidłowe zasady konstrukcji przyrządów spawalniczych. Jednak zasadniczym przekazem tego konkretnego przeglądu literatury jest przedstawienie teorii i przykładów przemysłowych z zakresu rozważanej tematyki. W rozprawie brakuje analizy aktualnego stanu wiedzy. Analiza taka powinna być oparta o przytoczenie najnowszych publikacji naukowych i wyraźnie wskazywać na to, co w zakresie danego zagadnienia zostało osiągnięte. To z kolei powinno się przełożyć na wskazanie niedostatków, które w sposób zasadny można wypełnić podjętym w rozprawie tematem. Finalnie Doktorant na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury powinien uzasadnić dlaczego podjął się przeprowadzenia badań opisanych w rozprawie.

Logiczna ciągłość typowo stosowana w edycji rozpraw doktorskich, w tym konkretnym przypadku nie została zachowana. Doktorant na początku nakreśla cel i tezę pracy, po czym przedstawia teorię związaną z tematyką uznając to za przegląd literatury.

Istotnym błędem jest brak wskazywania źródeł literatury. Dotyczy to przede wszystkim informacji przedstawianych w tekście, których źródeł nie wskazano. Dotyczy to także rysunków, gdyż w pracy prezentowanych jest wiele ilustracji, schematów typowych dla literatury tematu, co sugeruje że są one cytowane ze źródeł. Tymczasem w podpisach rysunków w większości przypadków nie podano odsyłaczy do pozycji literatury.

Pomimo powyższych uwag w mojej opinii cytowana w pracy literatura w dostatecznym stopniu naświetla stan wiedzy związany z problematyką podjętą w rozprawie.

#### **4. Charakterystyka treści rozprawy i jej ocena merytoryczna**

Rozdział pierwszy stanowi ogólne wprowadzenie do zaproponowanej w pracy tematyki badawczej. W rozdziale tym przedstawiono ogólną charakterystykę problemu odkształceń spawalniczych oraz wskazano istotność podjętej tematyki. Przedstawiono tu także w podstawowym zakresie opis metod numerycznych stosowanych do optymalizacji konfiguracji przyrządów spawalniczych celem minimalizacji odkształceń. Rozdział ten zakończono przedstawieniem celu i tezy pracy, co jest dość nietypowe. W zasadzie cel pracy oraz jej hipoteza powinny być nakreślone po przeprowadzeniu przeglądu literatury, gdyż zarówno cel jak i hipoteza wynikają z rozeznania stanu wiedzy w danym obszarze nauki.

W rozdziale drugim przedstawiono podstawowe pojęcia dotyczące technologii spawania, w tym zaprezentowano przykłady przyrządów spawalniczych, a także stosowane w przemyśle metody prostowania spawanych struktur. Zwrócono uwagę na uszkodzenia trwale mogące być efektem



niepoprawnego prostowania. Należy zwrócić uwagę, że w głównej mierze opisano tu metody stosowane w konkretnym przedsiębiorstwie, natomiast nie dokonano przeglądu literatury tematu.

W rozdziale trzecim opisano podstawowe zasady modelowania procesów spawania przy użyciu metody elementów skończonych. Przytoczono podstawowe zależności związane m.in. ze zjawiskami termomechanicznymi zachodzącymi podczas spawania. Przedstawiono sposób formułowania równań konstytutywnych. Opisano wpływ rodzaju stosowanych elementów skończonych na czas oraz precyzję obliczeń. Zwraca uwagę fakt, że rozważany rozdział stanowi jedynie przedstawienie teorii, natomiast wyraźnie brakuje tu dociekliwego rozeznania co inni badacze zrealizowali w tej dziedzinie.

Rozdział czwarty to opis metodyki modelowania oraz optymalizacji stosowanych w pracy. Zaprezentowano w sposób ogólny możliwości zastosowania metody elementów skończonych do rozwiązywania zagadnień inżynierskich w różnych obszarach przemysłu. Opisano również potencjalne korzyści płynące z zastosowania modelowania w przemyśle, w celu wspomagania procesów decyzyjnych. W niniejszym rozdziale dokonano przybliżenia przyjętych metod optymalizacji. Zdefiniowano autorski system optymalizacji oraz zdefiniowano funkcję celu, wskazano także kryteria optymalizacji. Dokonano wreszcie analizy wpływu uwarunkowań technologicznych na wyniki optymalizacji.

W rozdziale piątym przedstawiono zasadnicze wyniki badań, których celem była weryfikacja funkcjonowania autorskiego systemu optymalizacji rozmieszczenia punktów mocowania w przyrządzie spawalniczym. Analizę przeprowadzono dla modelu CAD rzeczywistej konstrukcji pokrycia bocznego pojazdu kolejowego. Jest to element konstrukcyjny o znaczących wymiarach, przez co odkształcenia spawalnicze stanowią istotny problem technologiczny. Opisano tu sposób realizacji oraz kolejność prowadzenia operacji spawalniczych. Dla rozważanej struktury zaprezentowano przyjętą metodykę modelowania oraz optymalizacji konfiguracji przyrządu spawalniczego. W odniesieniu do przyjętego modelu podano dane materiałowe oraz dokonano charakterystyki tego modelu. Scharakteryzowano poszczególne etapy operacji spawania określając kolejność łączenia, właściwości spoiny pod względem geometrii oraz ilości wprowadzonego ciepła. Dla kolejnych operacji spawania przedstawiono wyniki modelowania MES obrazujące przemieszczenia po spawaniu występujące w poszczególnych obszarach konstrukcji. W moim przekonaniu w rozdziale tym brakuje typowej dla prac badawczych dyskusji. Zaprezentowano jedynie wyniki analiz, jednak cechą rozpraw naukowych jest podjęcie rozważań o wykazanych wynikach badań oraz ich przyczynach, tymczasem rozdział ten stanowi jedynie raport opisujący uzyskane rezultaty.

W końcowej części rozdziału dokonano porównania deformacji wykazanych w ramach modelowania z deformacjami rzeczywistej konstrukcji. Według Autora, zrealizowano walidację modelu, jednakże dokonano jedynie porównania wybranych wymiarów geometrycznych modelu oraz



obiektu rzeczywistego. Nie przedstawiono tu wymaganej dokładności wymiarowej rozważanej konstrukcji spawanej. Doktorant jedynie subiektywnie stwierdził, iż dokładność prezentowanego modelu optymalizacyjnego jest poprawna. Rozdział zakończono podsumowaniem, w którym stwierdzono, że na podstawie walidacji potwierdzono poprawność opracowanego systemu optymalizacji. Jednak takie stwierdzenie jest nieuprawnione ponieważ jak wspomniano powyżej, nie dokonano należytej walidacji zakładającej wymaganą dokładność, a jedynie stwierdzono poprawność funkcjonowania systemu.

Kolejny rozdział zawiera zakończenie, w którym m.in. nakreślono niewątpliwe korzyści mogące płynąć z wprowadzenia na szeroką skalę prezentowanego systemu optymalizacji. Zaznaczono także, że planowany jest dalszy rozwój omawianego sposobu optymalizacji dla innych elementów strukturalnych wytwarzanych w przedsiębiorstwie, w którym realizowano badania.

Na końcu pracy zamieszczono bibliografię, a także streszczenie w języku polskim oraz angielskim.

## **5. Uwagi merytoryczne**

W treści rozprawy pojawiają się pewne niejasności nasuwające uwagi, o których skomentowanie proszę Doktoranta w odpowiedzi na recenzję. Wymieniam najistotniejsze zagadnienia wymagające wyjaśnienia, które zwróciły moją uwagę:

1. Z treści pracy wynika, że proces rozmieszczenia podpór, pomimo że wspomagany jest algorytmem opracowanym przez Autora nie opiera się na wynikach badań lecz na wiedzy i umiejętności konstruktora. Może to prowadzić do niewłaściwego rozmieszczenia podpór i w ślad za tym niewłaściwego rozwiązania problemu.
2. Prezentowany w pracy proces optymalizacji punktów mocowań umożliwia jedynie wyznaczenie najkorzystniejszego rozmieszczenia podpór z rozwiązań analizowanych. Wydaje się bowiem, że uzyskane rozwiązanie nie jest rozwiązaniem optymalnym, gdyż algorytm nie umożliwia analizy wpływu zmian odległości między położeniem punktów mocowań na wartość odkształcenia konstrukcji. Być może zmiana odległości między podporami, inna oprócz rozpatrywanej, umożliwiłaby uzyskanie korzystniejszego rozwiązania.
3. Procedura optymalizacji wymaga bardzo dokładnej weryfikacji modelu MES z wynikami badań, gdyż uzyskiwane wyniki (str. 64, tab. 4) są do siebie zbliżone pod względem wartości. Jeżeli błąd modelu MES będzie porównywalny z rozrzutem wyników uzyskanych dla poszczególnych wariantów położenia punktów mocowań trudno będzie jednoznacznie wskazać rozwiązanie optymalne, szczególnie w przypadku bardzo złożonych konstrukcji.



4. W procesie optymalizacji należy zastanowić się nad uwzględnieniem wartości maksymalnych odkształceń konstrukcji, poprzez wprowadzenie dodatkowego ograniczenia lub modyfikację funkcji celu. W obecnej postaci możliwe jest wygenerowanie rozwiązania charakteryzującego się znaczącymi różnicami odkształceń w poszczególnych punktach mocowań, posiadającego taką samą wartość funkcji celu jak rozwiązanie charakteryzujące się zbliżonymi wartościami odkształceń konstrukcji.
5. Walidacja, polega na potwierdzeniu w sposób udokumentowany oraz zgodny z postawionymi założeniami, że zaproponowany model w sposób odpowiednio precyzyjny odwzorowuje modelowane zjawisko. W opracowaniu naukowym w ramach walidacji należałoby zdefiniować wymagany zakres dokładności modelu, wymiary powinny być ograniczone pomiędzy wartościami dopuszczalnymi. W pracy analiza porównawcza sprowadza się jedynie do stwierdzeń takich jak: „Różnica między wynikami MES a pomiarami rzeczywistymi wynosi 1.7 mm. Zmiana długości względem wartości nominalnej wyniosła 0.8 mm.” Owszem, ponieważ wymiar uzyskany w ramach modelowania zazwyczaj mieści się w zakresie pomiędzy wymiarem nominalnym a wymiarem rzeczywistym, można przyjąć, że analiza porównawcza wykazała satysfakcjonujące dla Autora wyniki. Jednak proces walidacji wymaga sformalizowanych analiz określających stopień zgodności modelu z modelowanym zjawiskiem rzeczywistym.

W ramach walidacji przedstawiono jedynie jeden wariant modelu, stwierdzając przy tym poprawność działania opracowanej metodyki. Być może inne warianty zapewniałyby wyższą dokładność.

## **6. Uwagi dotyczące edycji rozprawy**

Dokonując oceny rozprawy pod względem edycji, zasadniczo praca napisana jest poprawnym językiem, zgodnym z nomenklaturą podjętej tematyki. W pracy pojawiają się pewne błędy językowe. Zapewne błędy te wynikają ze stosowania pewnych sformułowań potocznych stosowanych w branży, inne być może wynikają ze stosowania skrótów myślowych przez Autora. Poniżej wymieniam jedynie przykłady błędnych sformułowań:

- „Przykład pracy materiału” (str. 23) praca jest wielkością fizyczną, użyto tego pojęcia w nieodpowiednim kontekście.



- „Materiałem rodzimym jest aluminium 6005 T6” (str. 59), jest to oczywiście stop aluminium, a precyzyjniej należałoby podać dodatkowo normę wedle której podano oznaczenie stopu, zatem powinno być „stop aluminium EN AW-6005-T6”.
- Błędny zapis jednostek, jest „KJ” powinno być „kJ” (str. 59).
- „paneli aluminiowych” (str. 13), powinno być „paneli wykonanych ze stopu aluminium”.
- „Przedstawiono pomiar” (str. 113, 114, 116, 117, 119), powinno być „Przedstawiono wyniki pomiaru”.
- „Wymiar MES” (str. 116, 117, 119, 120), powinno być np. „Wymiar wg analizy MES”.
- „Komponent” – pojawia się w pracy wielokrotnie w odniesieniu do elementów spawanych.
- „mocno ograniczona” (str. 4, 5, 66), to sformułowanie potoczne, niewłaściwe dla opracowań naukowych.

Separatory dziesiętne w opracowaniach polskojęzycznych należy zapisywać przy użyciu przecinka, a nie kropki. Tymczasem w pracy notorycznie używane są kropki jako separatory dziesiętne, sporadycznie jedynie poprawnie stosowane są przecinki.

Zastosowano nietypową dla prac doktorskich numerację rysunków, która jest jednolita dla całej rozprawy. Wprawdzie nie jest to błędem, jednakże znacznie czytelniejsza jest niezależna numeracja ilustracji w każdym z rozdziałów, która zazwyczaj jest stosowana w opracowaniach naukowych.

## **7. Podsumowanie i wniosek końcowy**

Po wnikliwej lekturze rozprawy doktorskiej stwierdzam, że wnosi ona istotny wkład w poszerzenie wiedzy w zakresie technologii spawania struktur cienkościennych.

Należy zwrócić uwagę, że recenzowana rozprawa doktorska zrealizowana została w ramach programu „Doktorat wdrożeniowy”, którego celem jest tworzenie warunków współpracy ośrodków akademickich z otoczeniem gospodarczym. Efekt działalności naukowej Doktoranta znalazł już zastosowanie praktyczne w przedsiębiorstwie i ma perspektywy szerszego zastosowania. W związku z tym, pomimo istotnych błędów edycyjnych, niedociągnięć, a także braku rzetelnej dyskusji naukowej praca doktorska stanowi wartość dodaną w swojej dyscyplinie naukowej i co ważne wynik prac jest użyteczny, a jego wdrożenie faktycznie może efektywnie przyczyniać się do poprawy efektywności technologii spawania struktur cienkościennych.

Mając na uwadze wymagania ustawowe i dokonując oceny rozprawy w kontekście spełnienia wymagań *Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*, w moim przekonaniu Doktorant spełnił te wymagania poprzez:



1. Oryginalne rozwiązanie problemu naukowego dotyczącego istotnego zagadnienia jakim jest minimalizacja odkształceń spawalniczych. Oryginalność tego rozwiązania polega przede wszystkim na identyfikacji problemu, opracowaniu i wykonaniu systemu numerycznego do optymalizowania konfiguracji przyrządów spawalniczych.
2. Doktorant wykazał się ogólną oraz szczegółową wiedzą adekwatną do standardów przewodu doktorskiego. Udokumentowana w rozprawie doktorskiej wiedza Autora jest zgodna z dyscypliną naukową, w której Doktorant ubiega się o stopień naukowy.
3. Autor rozprawy wykazał, że potrafi samodzielnie prowadzić badania naukowe, potrafi też samodzielnie zaprojektować i wytworzyć odpowiednie narzędzia do realizacji prac badawczych.

W związku z powyższym w mojej ocenie przedłożona do recenzji rozprawa doktorska spełnia ustawowe wymagania stawiane kandydatom do stopnia doktora określone w *Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 poz. 1668 z późn. zm.)*. Na tej podstawie wnioskuję o dopuszczenie Pana mgr. inż. Tomasza Zadrożnego do publicznej dyskusji nad jego rozprawą doktorską w dyscyplinie *Inżynieria Mechaniczna*.