



**POLITECHNIKA  
GDAŃSKA**

Dr hab. inż. Dariusz Fydrych, prof. PG  
Zakład Technologii Materiałowych i Spajania  
Instytut Technologii Maszyn i Materiałów  
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa  
Politechnika Gdańska

Gdańsk, 1.12.2023 r.

### RECENZJA

**rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Tomasza Zadorożnego pt.:**  
**„Minimalizacja odkształceń cieplnych w wyniku inteligentnej optymalizacji**  
**rozmieszczenia punktów mocowań w obszarze komponentu spawanego”**  
wykonanej pod opieką promotora Pana dr. hab. inż. Mirosława Szczepanika, prof. PŚI  
opracowana na zlecenie Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna  
Politechniki Śląskiej  
z dnia 27 września 2023 r.

### Wprowadzenie

Cechą charakterystyczną procesów spawania jest tworzenie połączeń przy zastosowaniu źródeł ciepła, które stapiają brzegi spawanych materiałów. Konsekwencją takiego oddziaływania jest utworzenie złącza spawanego przy jednoczesnym zachodzeniu dodatkowych zjawisk. Do najważniejszych można zaliczyć zmiany fizykochemiczne obszarów złącza ze szczególnym uwzględnieniem SWC i powstawanie naprężeń spawalniczych, których wynikiem są odkształcenia. Przedstawione mechanizmy w istotny sposób wpływają na właściwości eksploatacyjne złączy spawanych. Przemiany metalurgiczne mogą prowadzić do formowania się niepożądanych struktur, czego efektem jest obniżenie właściwości wytrzymałościowych oraz wzrost kruchości. Naprężenia i odkształcenia prowadzą do utraty stateczności wymiarowej konstrukcji, co również niekorzystnie wpływa na jej trwałość eksploatacyjną.

Recenzowana rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Tomasza Zadorożnego została zrealizowana w ramach programu „Doktorat wdrożeniowy” w dyscyplinie naukowej Inżynieria Mechaniczna. Moim zdaniem tematyka pracy doktorskiej Pana mgr. inż. Tomasza Zadorożnego wpisuje się idealnie w nowoczesne trendy naukowe obejmujące analizę relacji między historią cieplną spajania a odkształceniami będącymi jej pośrednią konsekwencją. Doktorant w swojej dysertacji podejmuje zagadnienia istotne z praktycznego i naukowego punktu widzenia. Główną ideą jest opracowanie systemu wspomagającego dobór rozmieszczenia punktów mocowania

elementów spawanych bazującego się na modelowaniu MES i autorskich algorytmach. W świetle analizy aktualnego stanu literatury przedmiotu podjęcie przez Doktoranta takiej tematyki uważam za w pełni uzasadnione. Cel, przedmiot i treść opiniowanej pracy doktorskiej są ściśle dopasowane do dyscypliny Inżynieria Mechaniczna.

### **Charakterystyka i ocena formalna rozprawy**

Struktura rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Tomasza Zadorożnego wprawdzie nie jest zbliżona do najbardziej popularnego układu (tzw. IMRaD), ale można ją w odniesieniu do podjętej tematyki uznać za poprawną. Praca składa się z siedmiu rozdziałów przedstawionych na 129 stronach, które obejmują trzy główne części: wprowadzenie (jeden rozdział), stan zagadnienia w świetle literatury (jeden rozdział), badania i analizy własne (trzy rozdziały), zakończenie oraz bibliografię. W pracy znajdują się również: spis treści i streszczenie w języku polskim i angielskim. Autor nie zamieścił wykazu ważniejszych oznaczeń i skrótów, spisów tabel i rysunków oraz innych załączników, które nie są wprawdzie wymagane, jednak są często umieszczane w pracach doktorskich. Mam kilka zastrzeżeń do formy i zaplanowania spisu treści. Po pierwsze spis treści nie ma nagłówka, po drugie na podstawie analizy spisu treści trudno jest ocenić, w którym miejscu pracy kończy się analiza stanu zagadnienia w świetle literatury a zaczynają badania własne. W tym kontekście skłaniałbym się jednak do przeniesienia rozdziału „Cel i teza pracy” za część literaturową, co umożliwiłoby wyraźne rozgraniczenie dwóch podstawowych elementów rozprawy. Ponadto uważam, że korzystne dla czytelności opisu badań własnych byłoby zamieszczenie (przed tezą rozprawy) schematu ilustrującego zakres realizowanych prac. Uważam, że poprawiłoby to znacznie czytelność i odbiór dysertacji.

Cel i teza pracy zostały podane na stronie 8. Doktorant sformułował cel główny brzmiący: „...opracowanie metody optymalizacji rozmieszczenia punktów mocowań w obszarze komponentu spawanego przy użyciu programu metody elementów skończonych oraz algorytmów optymalizacji w celu minimalizacji odkształceń cieplnych po procesie spawania.” oraz następujący cel dodatkowy: „...wdrożenie w przemyśle innowacyjnych rozwiązań, które pozytywnie wpłyną na proces produkcyjny oraz przyniosą realne oszczędności.”

W dalszej kolejności Pan mgr inż. Tomasz Zadorożny przedstawił zakres prac i sformułował tezę rozprawy w następującej postaci: „Zastosowanie systemu bazującego na połączeniu metody elementów skończonych oraz parametrycznego modelu spawanego komponentu umożliwia odpowiedni dobór punktów mocowań w obszarze konstrukcji spawanej oraz minimalizację odkształceń cieplnych we wczesnym etapie procesu przygotowania produkcji, co przekłada się na znaczną poprawę jakość produktu końcowego oraz eliminuje lub znacząco ogranicza konieczność napraw.” Teza jest postawiona prawidłowo. W treści rozprawy zabrakło jednak wyraźnego stwierdzenia, że teza pracy została potwierdzona, co można było zrobić w ostatnim akapicie pracy na stronie 128.

Literatura obejmuje 80 pozycji źródłowych, w tym jedną publikację naukową, której Doktorant jest współautorem. W spisie literatury znajdują się artykuły anglojęzyczne i polskojęzyczne, a także pozycje książkowe. Niestety, wskutek braku cytowań w treści pracy, nie można potwierdzić prawidłowości przeprowadzenia przez Autora przeglądu literatury. Jest to bardzo ważny aspekt każdego raportu z badań. Dlatego uważam, że rażącym przejawem niestaranności Doktoranta w aspekcie formalnym pracy jest sposób cytowania źródeł literaturowych, a właściwie brak właściwych odniesień do literatury. W całej rozprawie Autor zacytował 4 (słownie: cztery) prace ze spisu literatury, który zawiera 80 pozycji.

Stwierdzam, że w wielu przypadkach ta niestaranność dotyczy informacji ogólnych, dostępnych w podręcznikach i powszechnie znanych specjalistom. Jednak uważam, że nawet taka podstawowa wiedza powinna być odpowiednio poparta źródłami. Niestety, również w sytuacji podawania informacji o charakterze szczegółowym Doktorant nie zachował wymaganej staranności w cytowaniu źródeł literaturowych. W moim odczuciu jest to najpoważniejsze uchybienie formalne i merytoryczne. Właściwe cytowanie prac poprzedników stanowi dowód na przeprowadzenie rzetelnego przeglądu literatury, umożliwia czytelnikom sięgnięcie do innych prac w celu pogłębienia wiedzy oraz jednoznacznie zapobiega ewentualnym wątpliwościom natury etycznej. Dodatkowo dokładniejsze wskazywanie źródeł pozwoliłoby na odróżnienie efektów prac własnych autora od tych zaczerpniętych z literatury. Jest to szczególnie odczuwalne w przypadku zamieszczonych w rozprawie rysunków. Ponadto w treści pracy zacytowano książkę: Lemaître i Chaboche, 1994 nie uwzględnioną w spisie literatury.

Kolejnym błędem jest brak oznaczania zdjęć stanowiących jeden rysunek. Moim zdaniem każde zdjęcie powinno być podpisane a), b), c)..., a następnie powinno to być uwzględnione w podpisie rysunku i tekście pracy. W innym przypadku rozprawa traci informatywność, np. nie jest jasne, czy palniki pokazane na rysunku 16 czymś się różnią. Ta uwaga dotyczy również rysunków: 17, 21, 22, 27, 28, 30, 31, 32, 33, 68, 71, 73, 75, 77, 79, 81, 83, 85, 88, 91, 94, 99, 98, 100 i 102. Zamieszanie potęguje błędne miejsce wskazania rysunku w tekście: zapis „(rys. 16)” powinien być umieszczony jedno zdanie wcześniej.

Poza tym Autor nie ustrzegł się innych błędów formalnych i edytorskich, wśród których wymienię:

- stosowanie zwrotów w pierwszej osobie, np. „możemy”, „poszukujemy”,
- „mocno ograniczona” (powinno być: „bardzo ograniczona”),
- „Poniżej na rys. 6” – „poniżej” nie jest potrzebne przy wskazaniu rysunku,
- błędy interpunkcyjne: brak przecinków, kropka po „nr”.

### **Ocena merytoryczna rozprawy**

Przedmiotem rozprawy jest weryfikacja możliwości minimalizacji odkształceń spawalniczych w przypadku wybranych konstrukcji spawanych w przemyśle transportowym

(budowa pojazdów szynowych) poprzez określone rozmieszczenie punktów mocowań. Doktorant prawidłowo zrealizował założone zadania badawcze będące przedmiotem pracy. Są to badania jednocześnie podstawowe (dotyczą analizy mechanizmów fizycznych), jak również użytkitarne (wnioski mają charakter praktyczny).

Zgodnie z tym, co podaje na stronie 8. Doktorant, prace ukierunkowane na osiągnięcie celu naukowego obejmowały przede wszystkim:

- zapoznanie się z procesem produkcyjnym w przedsiębiorstwie oraz przypadkami deformacji po procesie spawania dla różnych komponentów,
- przegląd literatury w zakresie spawalnictwa oraz symulacji procesów spawania metodą elementów skończonych,
- przeprowadzenie próbnych symulacji w celu wyboru postaci źródła ciepła oraz metody modelowania, opracowanie algorytmów wspomagających proces tworzenia modelu numerycznego oraz metody optymalizacji,
- przeprowadzenie procesu optymalizacji dla próbki testowej,
- przeprowadzenie symulacji procesu, który obecnie jest prowadzony w przedsiębiorstwie w celu sprawdzenia zbieżności wyników oraz walidacji zaproponowanego systemu.

Dla osiągnięcia celów rozprawy Pan mgr inż. Tomasz Zadorożny wykorzystał techniki modelowania numerycznego oraz weryfikujące je badania eksperymentalne. Głównym osiągnięciem Doktoranta jest opracowanie systemu umożliwiającego złożone analizy odkształceń spawalniczych elementów spawanych na podstawie ich zdefiniowanego kształtu, wymiarów i materiału, geometrii spoiny, parametrów spawania oraz rodzaju i wstępnej lokalizacji podpór. System umożliwi również ocenę wpływu kolejności wykonywania spoin na wymiary złączy, co zostało pokazane w rozdziale 4.5. Do eksperymentalnej weryfikacji wyników uzyskanych z systemu Kandydat wybrał złożoną konstrukcję – poszycie boczne pojazdu kolejowego. Konfrontacja wyników pomiarów odkształceń konstrukcji wykonanych w warunkach określonych przy użyciu systemu upoważniła Doktoranta do potwierdzenia skuteczności opracowanego systemu jako narzędzia do minimalizacji odkształceń spawalniczych.

Na zakończenie Autor prawidłowo zinterpretował wyniki badań zamieszczając w rozprawie podsumowanie części badawczej oraz rozdział 6 zatytułowany „Zakończenie”. Oprócz podsumowania wyników badań własnych przedstawił w nim proponowane kierunki dalszych badań, co świadczy o perspektywicznym traktowaniu przez Niego poruszonej w rozprawie tematyki i chęci dalszego rozwoju.

Jak wspominałem wcześniej, praca zawiera wiele sformułowań ogólnych, które wymagają uzasadnienia przez przytoczenie właściwych źródeł. Wymienię tylko kilka przykładów: „Najczęściej stosowanymi metodami spawania łukowego są metody MIG, MAG i TIG” (strona 4.), „Poniżej przedstawiono kilka przykładów, z różnych dziedzin przemysłu, w których sprawdzają się rozwiązania systemowe oraz symulacje MES:” (strona 45.), „Optymalizacja

rozmieszczenia podpór podczas procesu spawania w celu minimalizacji odkształceń trwałych jest istotnym wyzwaniem z punktu widzenia inżynierii oraz przemysłu.” (strona 121.). Są to w większości przypadki twierdzeń silnie i trwale umocowanych w wiedzy dotyczącej rozpatrywanego zagadnienia, jednak niektóre stanowczo wymagają poparcia źródłami. Taka sytuacja ma miejsce dla pierwszego z wyżej przytoczonych przykładów. Moim zdaniem, nie można oceniać popularności i obszaru zastosowania procesów spajania w oderwaniu od grupy materiałowej i regionu geograficznego, a właściwie dominującego w danym regionie przemysłu.

Rozdział 2 zatytułowany jest „Proces spawania, przyrządy spawalnicze, prostowanie”. W moim przekonaniu ten rozdział powinien zostać podzielony na przykład na dwa rozdziały obejmujące przegląd literatury dotyczący kolejno: naprężeń i odkształceń spawalniczych oraz metod ograniczania odkształceń: mechanicznych i cieplnych. W obecnej postaci rozdział ten nie jest spójny, a jego złożony tytuł to potwierdza. Pierwszy akapit rozdziału stanowi powtórzenie akapitu, który został już wcześniej przytoczony na stronie 4.

Również tytuł podrozdziału 4.5 jest sformułowany nieprawidłowo: „Wpływ kolejność spawania na uzyskane wyniki”. Taki tytuł nie pozwala na ocenę, co było wielkością wyjściową w opisanych w nim badaniach. Rys. 24 ma błędny podpis: „Efekt rozrostu ziaren podczas procesu grzania”.

Do drobniejszych uchybień merytorycznych zaliczyłbym nieprawidłowości terminologiczne:

- „prędkość przesuwu” (powinno być: „prędkość spawania”),
- „natężenie” (powinno być: „natężenie prądu spawania”),
- „napięcie” (powinno być: „napięcie łuku”),
- „rozwiercie rozporu” (nie udało mi się ustalić, co to znaczy),
- „chłodny materiał” (powinno być: „materiał o niższej temperaturze”),
- błędy z zapisie nazwisk sławnych uczonych: Lagrange, Poisson, Kirchoff.

Pan mgr inż. Tomasz Zadorożny opracował technologię spawania obejmującą określony naukowymi metodami sposób mocowania elementów przed spawaniem, a następnie zweryfikował go eksperymentalnie. Zgodnie z ideą programu „Doktorat wdrożeniowy” wyniki prac przedstawionych w rozprawie zostały wdrożone w zakładzie Alstom, a nawet nagrodzone pierwszym miejscem w konkursie „Small but smart”.

Pomimo wylistowania wielu uwag krytycznych podkreślam, że rozprawa napisana jest zrozumiałym językiem technicznym, z zachowaniem większości reguł przyjętych dla prac naukowych. Autor posługuje się poprawną nomenklaturą, z wyłączeniem wspomnianych wcześniej niezgodności.

## Uwagi dyskusyjne

W czasie lektury rozprawy nasunęło mi się kilka istotnych wątpliwości, o których wyjaśnienie poproszę:

1. Z czego wynika brak właściwego cytowania źródeł literaturowych?
2. Co Doktorant rozumie pod pojęciem: „Konwekcja” stosując jednostkę:  $[W/(m^2K)]$  (tabela 2).
3. W tabelach 21-26 Doktorant zestawiał wyniki pomiaru wymiarów analizowanych konstrukcji określone numerycznie i eksperymentalnie podając również różnicę między tymi wartościami. Dlaczego Doktorant zastosował wartość bezwzględną różnicy tych wartości? Czy można wyciągnąć dodatkowe wnioski z analizy znaku różnicy?
4. W tytule rozprawy występują dwa interesujące pojęcia: „inteligentna optymalizacja” i „naprężenia cieplne”. Jak Doktorant rozumie znaczenie tych terminów w kontekście rozważanych w rozprawie zagadnień?
5. W pracy przedstawiono wyniki analiz i eksperymentów dla złączy wykonanych ze stopu aluminium 6005 T6 i stali S500MC. Jakie były powody wybrania tych materiałów? Czy Doktorant weryfikował skuteczność przedstawionej metody na innych materiałach i rozwiązaniach konstrukcyjnych?
6. Jak Doktorant definiuje często używane w pracy pojęcie: „komponent spawany” w odniesieniu do standardowo stosowanych w spawalnictwie pojęć: „złącze spawane” oraz: „konstrukcja spawana”?

Pomimo powyższych uwag i wątpliwości, rozprawę oceniam pozytywnie pod względem merytorycznym. W moim przekonaniu, Doktorant udowodnił, że jest dobrze przygotowany metodologicznie do planowania i realizacji badań naukowych.

## Wniosek końcowy

Opiniowana praca doktorska jest oryginalnym i wartościowym merytorycznie osiągnięciem naukowym Pana mgr. inż. Tomasza Zadorożnego. W swojej rozprawie Doktorant zaprezentował komplementarne i dobrze uzasadnione wyniki analiz i badań. Zastosował w tym celu nowoczesne metody badawcze rozwiązując wynikający z praktyki produkcyjnej problem techniczny i naukowy. Praktyczna wartość przedstawionego rozwiązania technologicznego została potwierdzona przez wyróżnienie jej pierwszą nagrodą w konkursie grupy Alstom.

Opiniowana praca doktorska spełnia 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 Śląskiej o dopuszczenie Pana mgr. inż. Tomasza Zadorożnego do publicznej obrony w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.

Sporządził:

Dariusz Fydrych