

## RECENZJA

### rozprawy doktorskiej mgr inż. Tadeusza Pały pt. „Wytrzymałość i odporność na pękanie złączy spawanych laserowo ze stali ferrytycznych”

wykonanej pod kierunkiem  
dra hab. Ihora Dzioby, prof. Politechniki Świętokrzyskiej

#### I. Podstawa formalna opracowania recenzji

Formalną podstawę opracowania niniejszej opinii stanowi pismo z dnia 15.06.2022 o sygnaturze MAA-510/88/2022 informujące o powołaniu w dniu 26.05.2022 przez Radę Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej Politechniki Świętokrzyskiej na recenzenta rozprawy doktorskiej mgr inż. Tadeusza Pały pt. „Wytrzymałość i odporność na pękanie złączy spawanych laserowo ze stali ferrytycznych” wystosowane przez dra hab. inż. Sławomira Błasiaka, profesora Politechniki Świętokrzyskiej, Dyrektora Naukowego Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna oraz umowa o dzieło nr XII/DEC-M/20RD/22 obejmująca wykonanie recenzji rozprawy.

#### II. Ocena pracy doktorskiej

##### 1. Wprowadzenie

Tematyka pracy doktorskiej w głównej mierze koncentruje się na zagadnieniach technologii spawania oraz wpływu parametrów procesu łączenia elementów na wytrzymałość złącza oraz odporność na pękanie. Spawanie materiałów konstrukcyjnych jako metoda wykonywania tak zwanych połączeń nierozłącznych jest powszechnie znana i szeroko wykorzystywana w budowie maszyn i konstrukcji. Technika spawania wymaga nagrzania materiału łączonych elementów do temperatury topnienia w miejscu połączenia i ich zestalenie z użyciem lub bez użycia spoiwa.

Wiadomo również, że pomimo rozwoju metod i urządzeń spawalniczych nie można określić jednej uniwersalnej metody; ważnym czynnikiem jest tutaj materiał łączonych elementów a zasadniczo zmiany jego właściwości podczas i po procesie spawania. Mogą się one diametralnie różnić dla stanu przed i po spawaniu. Istnieją również materiały, które trudno się spawa a w przypadku różnych materiałów elementów łączonych czasami jest to wręcz niemożliwe. Parametry determinujące przebieg procesu spawania i przygotowanie miejsca łączenia ma wpływ również na rezultat końcowy: kształt spoiny, liczba ściegów czy też ilość ciepła doprowadzonego do spoiny, które determinuje jakość spoiny. Zbyt mała ilość energii nie pozwoli przetopić materiału, zbyt duża wywoła zmiany w strukturze materiału złącza w bardzo szerokim obszarze wokół spoiny. Przemiany fazowe stali przy zmianach temperatury wpływają na właściwości materiału w miejscu połączenia i w efekcie na trwałość złącza. Zdarza się, że właściwości materiału w strefie złącza są niższe niż właściwości materiału rodzimego. Wybór właściwej metody spawania i określenie parametrów procesu zwykle wymaga przeprowadzenia chociażby podstawowych badań wytrzymałościowych złącza a wprowadzenie na rynek nowych materiałów konstrukcyjnych jest dodatkowym problemem. Przed technologami pojawia się wyzwanie oceny procesu łączenia dla nowych materiałów przy determinowaniu metody i technologii spawania.

W przedstawionym kontekście podjęcie przez doktoranta problematyki weryfikacji różnych metod łączenia za pomocą spawania materiałów wykazujących efekty obniżenia ich właściwości w strefie złącza pod kątem doboru parametrów procesu spajania, a także podjęcie próby usystematyzowania tych zmian i opracowania modeli obliczeniowych, jest celowe i zasadne z punktu widzenia poznawczego i naukowego. Praca badawcza w obszarze technologii połączeń spawanych oraz modelowanie i obliczenia wytrzymałości złącza jako elementu procesu projektowania konstrukcji wpisuje się w dyscyplinę inżynierii mechanicznej i dziedzinę nauk inżynieryjno-technicznych.

## **2. Ogólna charakterystyka rozprawy**

Doktorant do recenzji przedstawił pracę w zwartej formie książki w miękkich okładkach formatu 165mm x 235 mm. Praca zawiera 138 stron. Treść pracy została podzielona na 10 rozdziałów z podrozdziałami. Na początku znajduje się spis treści oraz 2 strony spisu ważniejszych oznaczeń. Ostatnie dwie strony pracy zawierają streszczenie w języku polskim i angielskim. W pracy zamieszczono 97 rysunków oraz 10 tabel. Spis literatury zawiera 126 pozycji z czego 14 publikacji, których współautorem jest doktorant.

W pracy zasadniczy akcent położono na obszar badań eksperymentalnych oraz autorskich analiz. Na stronach od 9 do 30 zamieszczono podstawy teoretyczne zagadnienia zaś strony od 31 do 127 zawierają opis i analizę części eksperymentalnej. Badania własne autora rozprawy obejmują znaczącą część rozprawy.

We wstępie (Rozdział 1) autor dokonuje wprowadzenia w zagadnienie połączeń spawanych i analizy ich wytrzymałości oraz wskazuje metodę spawania laserowego jako metody stosunkowo nowej i niedostatecznie rozpoznanej.

Rozdział 2 poświęcony jest ogólnej charakterystyce metod spawania: laserowego, MIG/MAG oraz TIG. Doktorant wyjaśnia pojęcie energii liniowej spawania jako ważnego parametru procesu łączenia metali determinującego wielkość i zjawiska zachodzące w tak zwanej strefie wpływu ciepła. Strefa wpływu ciepła jest następnie szczegółowo opisana i scharakteryzowana. Część rozdziału 2 jest poświęcona również metodom oceny procesów pęknięcia materiałów konstrukcyjnych. Autor prezentuje znane kryteria opisu odporności na pęknięcie materiału jak kryterium Griffitha, kryteria oparte o współczynnik intensywności naprężeń oraz całkę J (całka Rice'a).

W rozdziale 3 doktorant przedstawia cel i zakres pracy. Celem pracy jest weryfikacja wybranych metod spawania i określenie optymalnych parametrów procesu spawania pod kątem uzyskania właściwości materiału w strefie złącza nie gorszych niż właściwości materiału rodzimego w tym również uzyskanie odpowiedniego poziomu odporności na pęknięcie. Przedmiotem badań będą stale ferrytyczne w szczególności stal wysokowytrzymała AHSS. Autor rozprawy zdefiniował tezę pracy, według której zakładane cele możliwe są do osiągnięcia przy zastosowaniu spawania laserowego. Stosownie do tego określono zakres badawczy pracy, który zakłada opracowanie technologii spawania i wykonanie próbných złączy, przeprowadzenie badań eksperymentalnych właściwości wytrzymałościowych i odporności na pęknięcie oraz opracowanie modelu numerycznego złączy spawanych do oceny wytrzymałości połączenia.

Rozdział 4 zawiera charakterystykę wybranych stali ferrytycznych: 13CrMo4-5, 16Mo3 oraz S960QC (opisywanej jako stal wysokowytrzymała AHSS). Następnie opisano metody i urządzenia do pomiaru twardości, badań metalograficznych, próby zginania. Dla określenia właściwości wytrzymałościowych przy rozciąganiu materiału w poszczególnych strefach wpływu ciepła wycięto próbki równoległe do kierunku spawania pochodzące z materiału rodzimego (MR), strefy wpływu ciepła (SWC), linii wtopienia (LW) oraz materiału spoiny (MS). Aby uniknąć wpływu ciepła wydzielanego podczas obróbki zastosowano cięcie strugą wodno-ścierną. Próbę rozciągania przeprowadzono na maszynie Zwick zaś badania odporności na pęknięcie na stanowisku MTS-250 z zachowaniem wytycznych ujętych stosownymi normami.



Zastosowano również pomiar odkształceń przy rozciąganiu z wykorzystaniem systemu wizyjnego ARAMIS, co posłużyło później do weryfikacji modeli numerycznych. Autor wskazuje również, że do budowy modelu numerycznego wykorzystał oprogramowanie ABAQUS w wersji 6.12.

Należy tutaj wskazać, że w tym rozdziale autor zamieścił wyniki badań wstępnych, które wykorzystano do sporządzenia wykresów zależności granicy plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie i odpowiadających im odkształceń oraz wykładnika  $n$  krzywej Ramgerga-Osgooda w zależności od poziomu twardości Vickersa HV10 (rysunek 4.14) co będzie przedmiotem dalszej części recenzji.

W rozdziale 5 autor dysertacji przedstawia tabele zawierające parametry wykonania złączy spawanych poszczególnych stali dla kilku typów złącza przyjmując oznaczenie L dla złączy laserowych, T dla złączy wykonanych metodą TIG i M dla złączy wykonanych metodą MAG. Jako istotny parametr procesu spawania materiału, z którego następnie pobrano próbki do badań autor wskazuje energię liniową spawania (ELS).

Rozdziały 6,7 i 8 zawierają wyniki badań i ich analizę dla poszczególnych materiałów. Ze względu na tę samą metodykę badań struktura i treść tych rozdziałów zawiera identyczne elementy. Dla każdego materiału i każdej badanej próbki złącza wykonanego różnymi technikami przeprowadzono pomiar twardości w kierunku prostopadłym do kierunku spawania (czyli w przekroju poprzecznym spoiny) sporządzając stosowne wykresy zmiany twardości w zależności od położenia względem środka spoiny. Autor przedstawia uzasadnienie tych zmian poprzez opis zmian strukturalnych w poszczególnych częściach złącza spawanego popartych zdjęciami mikrostruktury stali. Wykonana próba zginania posłużyła do oceny powstawania pęknięć. Dla analizowanych stali łączonych za pomocą spawania laserowego nie wykazano pęknięć, co, według autora rozprawy, może świadczyć o odporności materiału na kruche pękanie. Doktorant przeanalizował zmianę wartości granicy plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie w poszczególnych strefach złącza spawanego. W przypadku stali 13CrMo4-5 i 16Mo3 praktycznie każda metoda łączenia nie powodowała obniżenia właściwości wytrzymałościowych materiału w obszarze spoiny w stosunku do materiału rodzimego, co oznacza, że złącze przeniesie obciążenia. W przypadku stali wysokowytrzymałej S960QC spawanie metodą MAG pogorszyło tę relację na niekorzyść obszaru spoiny, zaś w przypadku spawania laserowego uzyskano właściwości wytrzymałościowe w złączu nie gorsze niż w materiale rodzimym, czym wykazano wyższość tej metody spajania dla tej stali.

W następnej kolejności doktorant przedstawia wyniki analizy odporności badanych stali na pękanie. Jako kryterium przyjęto wartość współczynnika intensywności naprężenia a jego wartość krytyczną doktorant określił na  $100 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ . W przypadku połączeń spawanych metodami TIG i MAG odporność na pękanie materiału złącza zwykle była niższa niż materiału rodzimego, ale wyższa od wartości krytycznej, co według autora zapewnia ciągły sposób pękania. W przypadku złączy wykonanych metodą laserową dla niektórych reżimów spawania (np. L2 dla stali 13CrMo4-5 na rys. 6.12 i stali 16Mo3 na rys.7.14) uzyskano odporność na pękanie wyższą w porównaniu do materiału rodzimego a w pozostałych przypadkach wyższą od wartości krytycznej.

Uzupełnieniem analizy eksperymentalnej są propozycje numerycznych modeli obliczeniowych złączy dla poszczególnych stali. W geometrii próbek do obliczeń symulacyjnych doktorant wydzielił strefy wpływu ciepła a właściwości wytrzymałościowe materiału w poszczególnych strefach określił na podstawie wykonanych badań wstępnych. Pozytywną weryfikację modelu numerycznego przeprowadzono w oparciu o zarejestrowane odkształcenia wykonane za pomocą systemu wizyjnego ARAMIS.

Rozdział 9 zawiera podsumowanie oraz wnioski. Autor dysertacji syntetycznie przedstawia przeprowadzone badania oraz formułuje uogólnione wnioski z badań. Konkludując doktorant potwierdza słuszność sformułowanej przez siebie tezy, że za pomocą spawania laserowego możliwe jest uzyskanie złączy o właściwościach materiału poszczególnych jego stref nie gorszych niż dla materiału

rodzimego. Podkreśla również, że dla stali wysokowytrzymałych AHSS parametry procesu spawania laserowego powinny się charakteryzować niskimi poziomami energii liniowej spawania.

Rozdział 10 zawiera spis literatury.

### 3. Ocena osiągnięcia

Rozprawa doktorska pt. „Wytrzymałość i odporność na pękanie złączy spawanych laserowo ze stali ferrytycznych” opracowana przez mgra inż. Tadeusza Pałę dotyczy aktualnych problemów projektowania maszyn i konstrukcji, gdzie do łączenia elementów wykorzystuje się spawanie. Głównym obszarem zainteresowania doktoranta było spawanie laserowe jako stosunkowo nowa i nierozpoznana, tak bardzo jak inne, technika łączenia metali jako remedium na uzyskanie lepszych właściwości materiału w obszarze złącza.

W głównej mierze praca ma charakter badawczy, eksperymentalny, gdzie główną zaletą w tym przypadku są walory poznawcze. Zważywszy, że doktorant zaplanował i przeprowadził szerokie spektrum badań biorąc pod uwagę różne materiały z grupy stali ferrytycznych oraz różne technologie spawania przy co najmniej dwóch różnych reżimach procesu spajania, wyniki tej pracy same w sobie już stanowią dużą wartość. Doktorant wykazał wysoki poziom wiedzy i umiejętności przy planowaniu i wykonaniu eksperymentów wykorzystując przy tym stosowne do problematyki pracy urządzenia i aparaturę badawczą. Prezentacja wyników badań i analiza cechuje się dużą szczegółowością i właściwie dobraną formą prezentacji.

Ważnym aspektem podnoszącym wartość pracy jest podjęcie próby opracowania modelu numerycznego złącza spawanego, który cechuje się dużym stopniem szczegółowości jeżeli chodzi o odniesienie do rzeczywistej struktury (stref) w obszarze złącza. Ten cel pracy został osiągnięty i pozytywnie zweryfikowany wynikami pomiarów odkształceń w próbie rozciągania. Ważnym problemem przy tego typu obliczeniach jest odpowiedź na pytanie jakie właściwości materiału należy wprowadzić do modelu obliczeniowego w obszarze złącza a jakie w obszarze materiału rodzimego. Doktorant rozwiązał problem parametrów materiałowych jak np. granica plastyczności, granica wytrzymałości na rozciąganie materiału dla każdej z wyróżnionych stref złącza: spoiny, linii wtopienia, strefy wpływu ciepła i materiału rodzimego uzależniając je od wartości twardości przedstawiając stosowne wykresy uzyskane podczas eksperymentu. Chodzi tutaj o rysunek 4.14 na stronie 45, który moim zdaniem powinien być bardziej wyróżniony w rozprawie i dokładniej przedyskutowany. Zaproponowane modele numeryczne mogą być z powodzeniem wykorzystywane na etapie projektowania do oceny wytrzymałości złączy i oceny pracy złącza pod obciążeniem.

Jako ważny rezultat pracy należy również uznać wyniki analizy pod kątem optymalizacji przebiegu procesu spawania. Autor rozprawy wykazał skuteczność metody spawania laserowego w przypadku łączenia stali ferrytycznych podając we wnioskach energię liniową spawania (ELS) jako kryterium determinujące dobór parametrów procesu łączenia stali spawaniem laserowym.

Oceniając rozwój i przygotowanie doktoranta do podjęcia problematyki zawartej w jego rozprawie doktorskiej należy uwzględnić 14 współautorskich pozycji w spisie literatury, gdzie możemy znaleźć pozycje indeksowane w Web of Science (WoS). Na dzień sporządzania recenzji w spisie WoS widnieje 11 pozycji, dla których indeks  $h=4$ , co moim zdaniem jest dużym osiągnięciem.

### 4. Uwagi szczegółowe i pytania do pracy

Analiza treści rozprawy doktorskiej nasuwa także pewne uwagi szczegółowo odnoszące się do poruszanych zagadnień i w związku z tym pojawiają się pytania, czasem o charakterze dyskusyjnym:

1. Autor używa sformułowania „charakterystyki wytrzymałościowe” w odniesieniu do wartości granicy plastyczności czy granicy wytrzymałości na rozciąganie, co moim zdaniem jest błędne. Z określeniem charakterystyki zwykle kojarzy się funkcja przedstawiana na wykresach. Powinno być „właściwości wytrzymałościowe materiału” lub ewentualnie krócej „właściwości materiału”.



- Sytuacja konsekwentnie powtarza się wielokrotnie w całej pracy, dla przykładu na stronach 31, 38, 40, w podsumowaniu na stronie 74, podpis pod rysunkiem 6.6. czy też tytuł podrozdziału 7.4. na stronie 85. Na stronie 42 u dołu doktorant pisze nawet o „wartościach charakterystyk” co jest już bardzo niejasne. Doktorant mówi też o „poziomach charakterystyk” jak w rozdziale 9 na stronie 126 (wiersz 15 od góry).
2. Na stronie 45 zamieszczono rysunek 4.14 przedstawiający zależności: granicy plastyczności, wytrzymałości doraźnej na rozciąganie, odpowiadających im odkształceń oraz wykładnika w równaniu Ramgerga-Osgooda od twardości HV10. Doktorant wskazuje, że punkty uzyskano eksperymentalnie na podstawie wyników próby rozciągania dla próbek wyciętych z poszczególnych stref złącza. Określono równania regresji, które później są wykorzystywane do wyliczenia właściwości materiałów do obliczeń MES. Pojawia się tutaj kilka pytań i zagadnień dyskusyjnych:
    - czy wykresy na rys. 4.14 opracowano na podstawie zbiorczych wyników dla trzech badanych stali? Czy na podstawie tych wykresów można determinować wartości właściwości wytrzymałościowych dla innych stali z tego samego gatunku, czy też np. można to uogólnić na wszystkie stale?
    - dlaczego jako model regresji wybrano wielomian 2-go stopnia dla wszystkich analizowanych parametrów? W przypadku  $R_e$  i  $R_m$  zastosowanie modelu liniowego powinno dać nie gorszą ocenę regresji za pomocą współczynnika  $R^2$ .
    - wartość współczynnika korelacji dla regresji przedstawionej na rysunku 4.14d wynosi  $R^2=0,399$ . Na jakiej podstawie doktorant uznał tę wartość za wystarczającą? Brakuje krytycznego podejścia do oceny równania regresji. W zakresie twardości  $HV10=330\div390$  pojawia się znaczny rozrzut wyników i na prezentowanym wykresie możemy mówić o tzw. chmurze punktów. Jaki to ma wpływ na wyniki obliczeń symulacyjnych? Czy można jakoś uzasadnić taki rozrzut w tym przypadku?
    - problem oceny wyników analizy regresji można rozwiązać za pomocą testów statystycznych potwierdzających lub odrzucających przyjęty model regresji, szczególnie dla przypadku na rys. 4.14c.
  3. Przykładowe zdjęcia próbek po wykonaniu badania na zginanie są nieczytelne w odniesieniu do pojawiania się pęknięć, np. rys. 6.5b dla złączy laserowych stali 13CrMo4-5, rys. 7.9 dla stali 16Mo3; w jaki sposób oceniano pęknięcie materiału?
  4. Na stronie 67 pod rysunkiem 6.10 doktorant określił wartość krytycznego współczynnika intensywności naprężeń na poziomie  $100 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  przyjmując, że wartości powyżej będą gwarantowały mechanizm pęknięcia ciągliwego. Na jakiej podstawie przyjęto tę wartość, czy została uzyskana eksperymentalnie, czy też zaczerpnięta z literatury? Powinno to być wyraźnie wskazane. Dla pozostałych stali nie wskazano tej wartości i należy domniemywać, że porównywano wszystkie analizowane materiały do tej samej wartości  $100 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ .
  5. Na stronie 90 ostatni akapit przed rozdziałem 7.6. Czy opis dotyczy rys. 7.14 przedstawiającego odporność na pęknięcie złączy laserowych? Doktorant wskazuje, że dla złącza oznaczonego jako L4 (linia pomarańczowa na rys. 7.14) w materiale spoiny odporności na pęknięcie przyjmuje wartość, która wskazuje na pojawienie się kruchego pęknięcia a pozostałe złącza cechuje odporność na pęknięcie właściwa dla pęknięcia ciągliwego. Tymczasem na wykresie złącza L1, L3 i L5 w materiale spoiny mają odporność na pęknięcie niższą niż złącze L4, co jest sprzeczne z komentarzem autora rozprawy. Czy ten opis nie dotyczy przypadkiem spoiny oznaczonej jako L3 (kolor zielony)?
  6. Przy opracowaniu modelu numerycznego złącza autor definiuje kilka obszarów modelu MES odpowiadających strefom wpływu ciepła w złączu spawanym. W jaki sposób zdefiniowane szerokość tych stref w modelu? Czy odpowiadają one wynikom pomiarów np. z rysunków 6.1, 7.1 czy 8.1? Jak można to uogólnić na dowolny przypadek dla symulacji obciążenia innego złącza i innego materiału?
  7. Przy porównywaniu wyników obliczeń MES z wynikami pomiarów eksperymentalnych z systemu ARAMIS doktorant ocenia ich zgodność jako dobrą (np. w rozdziale 8.8, 6 wiersz od dołu).

Tymczasem dysponując danymi pokazywanymi na wykresach (np. rys. 8.26) można było obliczyć chociażby błąd względny obliczeń w odniesieniu do wyników eksperymentu.

## 5. Uwagi redakcyjne

Ogólnie rozprawa doktorska jest dobrze opracowana pod względem redakcyjnym, jest staranna i czytelna. Tekst pracy zasadniczo jest wolny od błędów literowych, wyrażen potocznych. Treść rozprawy jest spójna i ułożona logicznie. Podział na części i rozdziały nie budzi zastrzeżeń. Rozprawa zawiera elementy oczekiwane w tego typu opracowaniach naukowych jak przegląd literatury, cel i zakres pracy, program badań, opis wykorzystanych materiałów i aparatury badawczej, prezentację i analizę wyników badań.

Moim zdaniem w tytule pracy „Wytrzymałość i odporność na pękanie złączy spawanych laserowo ze stali ferrytycznych” przestawiono sztywny szereg wyrazów. Tytuł powinien brzmieć raczej „Wytrzymałość i odporność na pękanie złączy ze stali ferrytycznych spawanych laserowo”.

Zastrzeżenia budzą niektóre rysunki, w mojej opinii niedopracowane. Chodzi przede wszystkim o ich czytelność i wielkość czcionki w opisach jak np. na rysunku 2.2 na str. 14, 2.6 na stronie 20, wspomniany wcześniej wykres na rysunku 4.14, czytelność legend do wykresów na rysunkach 6.17, 7.17, 8.15, 8.20. Na rysunku 7.15 w ogóle brakuje legendy czy chociażby odnośników do krzywych na wykresach, nie wiadomo, które linie do jakich przypadków się odnoszą.

W podpisach pod rysunkami 2.4 i 2.5 jako materiał źródłowy, skąd zaczerpnięto rysunki, doktorant podaje stronę [www.docplayer.pl](http://www.docplayer.pl). W opracowaniu jak rozprawa doktorska nie powinny się pojawiać takie zapisy. Czy dokumenty tam zamieszczane nie prezentują przynajmniej nazwisk autorów?

## 6. Podsumowanie i wniosek końcowy

Przedstawioną rozprawę doktorską mgra inż. Tadeusza Pały pt. „Wytrzymałość i odporność na pękanie złączy spawanych laserowo ze stali ferrytycznych” pomimo przedstawionych uwag merytorycznych i zastrzeżeń edytorskich do rysunków oceniam pozytywnie.

Praca dotyczy zagadnień technologii i projektowania złączy spawanych, ma charakter eksperymentalny oraz obejmuje zagadnienia z zakresu modelowania. Autor rozprawy rozpoznał i zdefiniował problem badawczy, wykazał się stosowną wiedzą i umiejętnościami planowania badań i przeprowadzenia eksperymentu. Analizę i wnioski przeprowadzono i sformułowano w sposób poprawny, adekwatny do zagadnienia.

Jako najważniejsze osiągnięcie należy uznać obszerny zakres badań przeprowadzonych przez doktoranta oraz umiejętne wykorzystanie ich wyników do modelowania i prowadzenia obliczeń symulacyjnych. Nie bez znaczenia pozostaje również przedstawiona ocena technologii łączenia metali za pomocą spawania laserowego jako możliwość uzyskania spoin o lepszych właściwościach złącza w porównaniu do powszechniej stosowanych metod TIG czy MAG.

Uważam, że zakres pracy został przez doktoranta wypełniony potwierdzając postawioną w pracy tezę przez co osiągnięto cel pracy.

**Mając na uwadze przedstawione w recenzji aspekty stwierdzam, że przedstawiona do oceny rozprawa doktorska mgra inż. Tadeusza Pały spełnia wymagania stawiane przez Ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. z 2017r., poz. 1789) i może być podstawą do nadania stopnia doktora nauk technicznych w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna. Jednocześnie wnoszę o dopuszczenie recenzowanej rozprawy do publicznej obrony przed Radą Naukową Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Świętokrzyskiej.**

*Roland Pawliczek*