

dr hab. inż. Andrzej Dzierwa, prof. PRz
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza
ul. Powstańców Warszawy 8
35-959 Rzeszów
tel. +48 17 7432546
e-mail: adzierwa@prz.edu.pl

Rzeszów, 20.12.2024

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr. inż. Krzysztofa Chyły

pt. „Wykorzystanie metody FSW w łączeniu komponentów metalowych struktur foteli samochodowych”

Podstawą recenzji jest pismo o numerze RDIMe.512.6.2024 Przewodniczącej Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej p. dr. hab. inż. Alicji Piaseckiej – Belkhatat, prof. PŚ z dnia 23 października 2024 roku.

1. Uzasadnienie podjętego problemu

Współczesne globalne wyzwania związane z ochroną środowiska oraz dążeniem do poprawy efektywności energetycznej stawiają przed przemysłem motoryzacyjnym nowe wymagania. Jednym z kluczowych celów jest minimalizacja emisji dwutlenku węgla (6 lutego 2024 Komisja Europejska ogłosiła nowy cel redukcji emisji netto gazów cieplarnianych dla Unii Europejskiej, który zakłada ograniczenie emisji CO₂ do 2040 roku o 90% w porównaniu z rokiem 1990) czy też redukcja zużycia paliwa, co z kolei wymusza poszukiwanie nowoczesnych rozwiązań technologicznych. Kluczowym czynnikiem w osiągnięciu tych celów jest zmniejszenie masy pojazdów, co prowadzi do zwiększenia ich efektywności energetycznej i zmniejszenia emisji spalin. W konsekwencji wzrasta zapotrzebowanie na materiały lekkie, takie jak stopy aluminium, które dzięki swojej niskiej gęstości i wysokiej wytrzymałości idealnie nadają się do zastosowań w konstrukcjach transportowych.

Redukcja masy pojazdów wymaga jednak nie tylko zastosowania odpowiednich materiałów, ale także opracowania nowoczesnych technologii ich obróbki i łączenia. Jedną z bardziej obiecujących metod w tym zakresie jest zgrzewanie tarciove z przemieszaniem materiału (ang. Friction Stir Welding, FSW), która zyskuje coraz większe znaczenie zarówno w przemyśle motoryzacyjnym ale też w lotniczym, morskim czy kolejowym. Proces ten, opracowany w latach 90. XX wieku, opiera się na wykorzystaniu ruchu obrotowego narzędzia,

Biurowo Dziekana

wpłynęło dnia 02.01.2025
RD IMe 11511 2025
nr zał.

które powoduje miejscowe uplastycznienie materiału i jego przemieszanie w obszarze złącza. Dzięki temu możliwe jest uzyskanie wysokiej jakości spoin, które charakteryzują się doskonałymi właściwościami mechanicznymi i brakiem istotnych wad, takich jak nadmierna porowatość czy pęknięcia, typowych dla tradycyjnych metod spawalniczych. Ważną zaletą tej metody jest możliwość łączenia materiałów trudnospawalnych, co otwiera nowe perspektywy w projektowaniu zaawansowanych konstrukcji inżynierskich.

Można zatem stwierdzić, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Krzysztofa Chyły pt. „Wykorzystanie metody FSW w łączeniu komponentów metalowych struktur foteli samochodowych”, realizowana pod opieką naukową promotora prof. dr hab. inż. Krzysztofa Gaska wpisuje się swoją tematyką i zrealizowanym zakresem prac w aktualne obszary badań nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

2. Charakterystyka rozprawy doktorskiej

Przedstawiona do recenzji praca liczy w całości (wraz z załącznikami) 148 stron oraz obejmuje stronę tytułową (1 strona), spis treści (1 strona), streszczenie w języku polskim i angielskim (2 strony), wstęp (2 strony), sześć rozdziałów podzielonych na zwarte tematycznie podrozdziały (78 stron), bibliografię (7 stron), spis tabel i rysunków (5 stron) a także załączniki do pracy (49 stron) w postaci tabel z wynikami przeprowadzonych prac badawczych. Spis literatury zawiera 71 pozycji. Co prawda brak jest prac opublikowanych w ostatnich dwóch latach (2023-2024), natomiast liczba cytowanych prac z ostatnich pięciu lat wynosi 14. Niestety w tym zestawieniu nie zauważyłem żadnej pozycji autorstwa lub współautorstwa Doktoranta. Mam nadzieję że podczas obrony dowiem się więcej na temat działalności publikacyjnej Doktoranta. Kolejność rozdziałów i podrozdziałów oraz podział treści tworzą spójny i logiczny układ pracy. Na całość pracy oprócz tekstu składa się 69 rysunków i 32 tabele.

Rozprawę rozpoczyna „*Wstęp*”, w którym Autor zwraca uwagę na konieczność minimalizacji emisji dwutlenku węgla czy też zmniejszenia zużycia paliwa zarówno w przemyśle motoryzacyjnym jak i lotniczym, a jako jeden ze sposobów podaje redukcję masy całkowitej wyrobów. Stąd też zainteresowanie Doktoranta takimi materiałami jak stopy aluminium będące alternatywą dla wielu innych stosowanych rozwiązań. Autor zauważa również, że zgrzewanie tarciove z przemieszaniem materiału może być skuteczną i efektywną metodą obróbki tychże stopów pod warunkiem właściwego doboru parametrów obróbki. Końcowe fragmenty „*Wstępu*” poświęcone są omówieniu zagadnień, które będą w dalszej części przedmiotem rozprawy doktorskiej.

Rozdział 2 zatytułowany „*Przegląd literatury*” składa się z siedmiu podrozdziałów. Zaprezentowano w nich charakterystykę procesu zgrzewania tarciovego z przemieszaniem materiału a także omówiono przebieg procesu podając kluczowe parametry wpływające na jakość spoiny, jej wytrzymałość oraz mikrostrukturę. Autor zalicza do nich prędkość obrotową narzędzia, siłę docisku narzędzia, prędkość zgrzewania oraz kąt nachylenia powierzchni

oporowej narzędzia względem powierzchni zgrzewanej blachy. Jako, że profil i geometria narzędzia mają zasadniczy wpływ na jego zużycie oraz na jakość spoiny Doktorant dokonał krótkiego zestawienia wybranych stosowanych narzędzi FSW.

„Przegląd literatury” zawiera również zestawienie wad i zalet procesu zgrzewania tarcowego z przemieszaniem materiału odnoszące się zarówno do ogólnych ram procesu jak i szczegółowo do aluminium. Doktorant dokonał także charakterystyki stopów aluminium wykorzystywanych w przemyśle motoryzacyjnym oraz dokonał przeglądu metod łączenia stopów aluminium, zauważając, że FSW jest jedną z najnowszych i najskuteczniejszych metod łączenia trudno spawalnych stopów aluminium. Myślę, że warto byłoby zakończyć taki rozdział jak „Przegląd literatury” podsumowaniem, które w sposób syntetyczny ujmie kluczowe wnioski płynące z analizy zaprezentowanych źródeł literaturowych.

W rozdziale trzecim Autor prezentuje „problem badawczy oraz zakres pracy”. Jako problem badawczy definiuje możliwość uzyskania efektywności złącza na poziomie 70% i aby tego dokonać zamierza wykonać szereg badań z wykorzystaniem dwóch autorskich narzędzi do zgrzewania tarcowego. Niestety Autor nie definiuje w tym punkcie co rozumie przez efektywność złącza na poziomie 70%. Informacja o tym jak obliczyć wspomnianą efektywność złącza pojawia się dopiero w formie opisowej w rozdziale 5 na str. 41. Ponadto w bieżącym rozdziale, Doktorant określa dwa cele badawcze którymi są projekty wspomnianych wcześniej dwóch autorskich narzędzi do zgrzewania tarcowego z przemieszaniem materiału a także wzrost efektywności procesu spajania elementów metalowych struktur foteli samochodowych, poprzez zastąpienie aktualnego procesu nową metodą zgrzewania aluminium – FSW. Rozdział trzeci kończy wypunktowanie pod tytułem „układ logiczny pracy”, będące tak naprawdę skróconą wersją spisu treści.

Rozdział 4 to „Metodyka badawcza”. Doktorant opisuje w nim sposób przygotowania próbek do procesu zgrzewania tarcowego z przemieszaniem materiału, prezentując skład chemiczny wybranego stopu oraz jego właściwości mechaniczne. Myślę, że z tab. 4.1 spokojnie można byłoby usunąć pierwiastki które nie mają reprezentacji w tym stopie a przez to uprościć tabelę. Następnie Autor przedstawia urządzenie na którym realizowano proces FSW (zmodyfikowana frezarka uniwersalna) oraz sposób mocowania próbek. W kolejnym kroku Doktorant omawia dwa autorskie narzędzia do zgrzewania tarcowego z przemieszaniem materiału wykonane ze stali proszkowej Vanadis 23. Narzędzia te różniły się od siebie średnicą części roboczej oraz kątem przyłożenia kołnierza do elementów zgrzewanych. Nasuwają się jednak pytania o wytyczne przyjęte przy projektowaniu narzędzi oraz przede wszystkim o to jakie oryginalne cechy posiadały autorskie narzędzia na tle innych powszechnie stosowanych. W rozdziale tym zaprezentowano również przyjęty plan badań procesu zgrzewania tarcowego z przemieszaniem materiału różnicując prędkość obrotową na trzech poziomach zmienności oraz posuw na dwóch poziomach zmienności. Przyjęty plan eksperymentu należy uznać za poprawny jednakże dość ubogi jak na pracę doktorską. Jak sam Autor zaznacza w dysertacji – parametrów mających wpływ na jakość połączenia zgrzewanego jest dużo. Być może warto

byłoby ocenić istotność wpływu większej grupy parametrów stosując np. badania przesiewowe, z drugiej strony wiązałoby się to ze znacznym zwiększeniem liczby badań. „*Metodyka badawcza*” dostarcza również informacji o rodzajach przeprowadzonych badań doświadczalnych oraz aparaturze niezbędnej do ich przeprowadzenia. Badania zaplanowane do realizacji przez Doktoranta obejmują:

- badania wytrzymałości na rozciąganie – z wykorzystaniem maszyny Zwick/Roell Z250 kN,
- badania twardości – z wykorzystaniem twardościomierza LEITZ Miniland II przy obciążeniu 245,2v [Nm] i czasie obciążenia 10 [s],
- badania radiograficzne – z wykorzystaniem przenośnej jednostki radiograficznej o kierunkowej lampie głowicowej RTG 200 kV, chłodzonej powietrzem marki Eresco 42 MF2,
- badania metalograficzne – z wykorzystaniem mikroskopu stereoskopowego Olympus X-TR oraz mikroskopu metalograficznego Nikon M z obrazowaniem / profilowaniem 3D,
- badania chropowatości powierzchni – z wykorzystaniem testera chropowatości powierzchni MarSurf PS 10.

Rozdział 5 zatytułowany „*Wyniki badań*” w uporządkowany sposób prezentuje wyniki przeprowadzonych badań doświadczalnych oraz ich analizę. Badania wytrzymałości na rozciąganie wykazały, że najmniejszą wartością efektywności złącza charakteryzowała się próbka zgrzewana narzędziem B z prędkością obrotową 1000 [obr/min.] i prędkością posuwu równą 50 [mm/min.]. W tym przypadku efektywność złącza wyniosła 73%. Z kolei najwyższą wartością efektywności, na poziomie 82,9%, charakteryzowała się zgrzeina wykonana narzędziem A z następującymi parametrami procesu: z prędkość obrotowa 1200 [obr/min.] oraz posuw 70 [mm/min.]. Warto również zauważyć, że aż w pięciu przypadkach efektywność osiągnęła wartość na poziomie ok: 82%. Przeprowadzone badania twardości złączy wykonanych metodą zgrzewania tarcowego z przemieszczaniem materiału wykazywały m.in. charakterystyczny, podobny przebieg wartości twardości w kształcie litery „W”, a także wykazały zależność pomiędzy prędkością obrotową narzędzia a twardością spoiny – im większa wartość prędkości obrotowej tym większa twardość spoiny.

W rozdziale 5 Autor przedstawia również szereg wyników badań metalograficznych ale również i mikroskopowych. Prezentacja wyników wzbogacona jest obrazami z każdego wariantu badanych parametrów. Na podstawie przeprowadzonych badań Doktorant zauważa, że spoiny charakteryzowały się dość dużą porowatością oraz występowaniem pęcherzy gazowych stychnych do obszaru niepełnego stopienia strefy wpływu ciepła. Ponadto spoiny cechowały się brakiem pęknięć. Badania chropowatości wykazały że mniejszymi wartościami parametru Ra (średniego arytmetycznego odchylenia profilu od linii średniej) charakteryzowały

się próbki zgrzewane narzędziem A z zerową wartością kąta przylegania kołnierza do elementów zgrzewanych. Próbki zgrzewane z wykorzystaniem narzędzia B (poza jednym przypadkiem) charakteryzowały się wartościami parametru Ra kilkanaście i kilkadziesiąt procent większymi. W wyniku przeprowadzonych badań radiograficznych Autor stwierdza, że prędkość obrotowa narzędzia wydaje się być główną zmienną wpływającą na proces zgrzewania. Doktorant zauważa, że spoiny uzyskane przy najmniejszej badanej prędkości obrotowej – 1000 [obr/min.] – były wolne od wad, pustek i porowatości, co można przypisać dobrej zdolności płynięcia materiału dzięki optymalnej energii cieplnej, natomiast wzrost wartości prędkości obrotowych oznaczał wzrost obecności wad w postaci kraterów oraz pustek. Niestety z zamieszczonych w pracy zdjęć rentgenowskich nie ma możliwości potwierdzenia lub nie zamieszczonych stwierdzeń.

W rozdziale 6 „*Dyskusja otrzymanych wyników*” zaprezentowano próbę powiązania wyników badań doświadczalnych z parametrami procesu zgrzewania tarcowego z przemieszaniem materiału oraz określeniem ich wpływu na jakość otrzymanego złącza. Niejasnym jest pojawienie się podpunktu 6.1 (brak innych podpunktów) w sytuacji gdy ten podpunkt nie występuje również w spisie treści. Zresztą numeracja w spisie treści jest o jeden rząd mniejsza niż w zasadniczej części pracy.

W rozdziale 7 „*Podsumowanie i wnioski końcowe*” Autor syntetycznie podsumowuje wyniki swojej pracy, wskazując również na praktyczny aspekt przeprowadzonych badań. Trochę brak w niniejszym rozdziale nakreślenia kierunków potencjalnych dalszych badań, szczególnie biorąc pod uwagę wielość czynników wpływających na proces zgrzewania tarcowego z przemieszaniem materiału.

Kolejny rozdział rozprawy „*Literatura*” w której Autor przedstawił 71 źródeł bibliograficznych w kolejności ich powołania w Rozprawie. Literatura niewątpliwie wymagałaby ujednolicenia, niektóre pozycje zaczynają się od inicjałów imion, niektóre od nazwisk autorów, czasem nr DOI występuje jako hiperłącze, czasem jako tekst, czasem po nazwiskach trzech autorów pojawia się „et al.”, a w innym przypadku wymienia się nazwiska pięciu czy sześciu autorów itp.

Pracę kończy spis tabel i rysunków a także załączniki do pracy, w których w formie zbiorczych tabel zestawiono wyniki przeprowadzonych badań.

3. Ocena pracy, uwagi ogólne i szczegółowe

Pod względem metodycznym pracę oceniam pozytywnie. Odpowiada przyjętym celom, zadaniom badawczym i jest dostosowana do obowiązujących wymogów. Doktorant wykazał się wiedzą i umiejętnością stosowania różnych instrumentów i metod badawczych. W ramach realizacji pracy wykonano dwa autorskie narzędzia do zgrzewania tarcowego z przemieszaniem materiału a także przeprowadzono szereg badań, w których Doktorant

wykorzystał umiejętności planowania eksperymentu. Uzyskane wyniki potwierdziły słuszność przyjętego do realizacji planu badawczego. Praca napisana jest w większości poprawnym językiem (choć zdarzają się błędy edytorsko-redakcyjne czy też stylistyczne) z wykorzystaniem nazewnictwa inżynierskiego. Podczas zapoznawania się z treścią Rozprawy nasunęły się następujące uwagi:

- Na jakiej podstawie przyjęto dość wąski plan badań, biorąc pod uwagę wielość czynników wejściowych procesu FSW, o czym zresztą wspomina sam Autor, a także skąd wybór tego konkretnego stopu.
- Jakie oryginalne cechy posiadały autorskie narzędzia do procesu zgrzewania tarcowego z przemieszaniem materiału na tle innych powszechnie stosowanych?
- Na rysunkach narzędzi do zgrzewania (rysunki 4.3 i 4.4) warto byłoby podać chropowatość powierzchni, a na rys. 4.8 zaznaczyć wszystkie punkty pomiarowe wykorzystywane w badaniach twardości.
- W założeniach badań wytrzymałości na rozciąganie (str. 30) brakuje informacji/rysunku rozmieszczenia próbek na arkuszu, jest to dość istotne gdyż na początku i na końcu zgrzeiny są różne właściwości.
- Na rys. 5.4 (oś y) powinna być siła zrywająca, ponadto brak jednostek prędkości obrotowej i posuwu na rys. 5.3 – 5.7. Z kolei na rys. 5.9a (oś x) powinny być zaznaczone pozycje punktów pomiarowych jak na pozostałych wykresach w tym rysunku. Natomiast ze zdjęć rentgenowskich zamieszczonych w tabeli 5.24 nie da się nic odczytać.
- W pracy występuje szereg symboli i skrótów niekiedy wprowadzanych w części zasadniczej pracy bez wcześniejszej informacji co to za skrót (np. Mgf01, itp.). Warto byłoby zawrzeć w pracy wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów celem przejrzystości pracy.
- Ile powtórzeń pomiarowych wykonano dla każdej próbki w badaniach chropowatości powierzchni? Profilogramy zawarte w pracy prezentują losowo wybrane profile każdej próbki czy też te charakteryzujące się średnimi wartościami pomiarów?
- Występują usterki natury edytorsko – redakcyjnej, np.
 - ✓ w wielu miejscach jako separatory dziesiętne stosowane są zamiennie przecinki i kropki – powinny być wszędzie przecinki; ponadto występują pozostawione w tekście kropki w środku zdań czy też „pourywane” wyrazy (np. str. 41);
 - ✓ występują niezrozumiałe zwroty jak np. str. 15 „bardzo mniej potrzebnej energii”;
 - ✓ używanie skrótów w sposób niekonsekwentny, np. str. 8: Mig, Tig; str. 22: MIG, TIG; str. 23: mag, tig;
 - ✓ rys. 5.3 – 5.4 powinno być kN a nie KN, tabele 5.1 – 5.2 powinno być MPa a nie Mpa oraz R_m a nie Rm. Podobne uwagi dotyczą zbioru tabel znajdujących się w załącznikach do pracy;
 - ✓ literatura powinna zostać sformatowana i ujednolicona.

Przedstawione powyżej uwagi mają jednak w większości charakter dyskusyjny i nie obniżają w żaden sposób wartości merytorycznej ocenianej Rozprawy.

4. Wniosek końcowy

Rozprawę doktorską Pana mgr inż. Krzysztofa Chyły oceniam pozytywnie. Rozprawa stanowi niewątpliwy wkład do istniejącego stanu wiedzy w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Zawarty w Rozprawie materiał badawczy jest oryginalnym dorobkiem Doktoranta, który wykazał się znajomością literatury przedmiotu i umiejętnościami samodzielnego prowadzenia badań naukowych, a uzyskane efekty mają istotne znaczenia poznawcze i użytkowe.

W związku z powyższym stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Krzysztofa Chyły pt. *„Wykorzystanie metody FSW w łączeniu komponentów metalowych struktur foteli samochodowych”*, spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym (Dz. U. nr 65, poz. 595, z późn. zm.) i może być dopuszczona do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej.

Andrzej Dziwierz

