

Prof. dr hab. inż. Anna Rudawska
Katedra Informatyzacji i Robotyzacji Produkcji
Wydział Mechaniczny
Politechnika Lubelska

Lublin, dnia 12.02.2024 r.

Recenzja

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Eweliny Ozgi
pt.: „Wpływ procesu pneumokulkowania na nośność połączeń klejowych ze
stopu aluminium EN AW-2024-T3”**

Podstawą sporządzenia niniejszej recenzji jest pismo Pana Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza dr hab. inż. Andrzeja Burghardta, prof. PRz z dnia 10 stycznia 2024 roku nr RM-531-31-01/2024 o powołaniu na recenzenta pracy doktorskiej Pani mgr inż. Eweliny Ozgi nt. „Wpływ procesu pneumokulkowania na nośność połączeń klejowych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3”, do którego dołączono egzemplarz rozprawy doktorskiej.

1. Problem naukowy, hipoteza badawcza cele i zakres rozprawy

Na podstawie przeprowadzonej analizy stanu zagadnienia sformułowano problem badawczy, który dotyczy weryfikacji możliwości zwiększania nośności zakładkowych połączeń klejowych ze stopu aluminium oraz określenia sposobu przewidywania oraz kontroli efektów obróbki umacniającej.

Hipotezą badawczą sformuowaną w rozprawie przedstawiono w następującym brzmieniu: „Obróbka umacniająca strefy zakładki połączeń klejowych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3, realizowana metodą pneumokulkowania z odpowiednio dobranymi parametrami technologicznymi, pozwala zwiększyć ich nośność.”

W recenzowanej rozprawie przyjęto następujące cele w brzmieniu:

1. „zbadać wpływ wybranych parametrów technologicznych procesu pneumokulkowania na nośność połączeń klejowych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3”;
2. „wyjaśnienie mechanizmu wzrostu nośności połączeń klejowych w wyniku pneumokulkowania”;
3. „sprawdzenie możliwości wykorzystania różnych metod kontroli procesu pneumokulkowania takich jak próba Almena, pomiar chropowatości powierzchni, czy pomiar stanu naprężeń własnych do przewidywania nośności połączeń klejowych poddanych pneumokulkowaniu i oceny poprawności obróbki umacniającej.”

W celu osiągnięcia przedstawionych celów rozprawy przyjęto przedstawiono poniżej zakres prac:

- 1) doświadczalne zbadanie wpływu wybranych parametrów procesu pneumokulkowania (czasu obróbki, średnicy kulek i ciśnienia sprężonego powietrza) na nośność połączeń klejowych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3, chropowatość powierzchni próbek wykonanych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3, stan naprężeń własnych w warstwie wierzchniej próbek ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 oraz wartość strzałki ugięcia płytek kontrolnych Almena,
- 2) zbudowanie modeli matematycznych opisujących wpływ wybranych parametrów procesu pneumokulkowania (czasu obróbki, średnicy kulek i ciśnienia sprężonego powietrza) na nośność połączeń klejowych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3, wartość strzałki ugięcia płytek kontrolnych Almena, wartość wybranego parametru chropowatości powierzchni próbek wykonanych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 oraz wartość naprężeń własnych w warstwie wierzchniej próbek ze stopu aluminium EN AW-2024-T3,
- 3) zbadanie zależności pomiędzy nośnością połączeń klejowych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 poddanych pneumokulkowaniu, a wartością strzałki ugięcia płytek kontrolnych Almena, chropowatością powierzchni próbek wykonanych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 poddanych pneumokulkowaniu oraz stanem naprężeń własnych w warstwie wierzchniej próbek ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 poddanych pneumokulkowaniu,

-
- 4) porównanie metodami numerycznymi stanu naprężeń w spoinie klejowej połączeń obciążonych na rozciąganie, które były lub nie były poddane pneumokulkowaniu.

Zaplanowane prace zrealizowano z wykorzystaniem badań laboratoryjnych oraz numerycznych, których wyniki przyczyniły się do pozyskania wiedzy w określonej problematyce badawczej, co w dalszej konsekwencji pozwoli na sformułowanie wniosków na temat osiągnięcia postawionych w rozprawie celów oraz weryfikacji hipotezy badawczej.

Realizacja określonych celów rozprawy oraz zweryfikowanie przedstawionej hipotezy badawczej wymagały zarówno głębokiej analizy teoretycznej omawianej problematyki, jak też przeprowadzenia przez Doktorantkę wielu różnorodnych i obszernych badań eksperymentalnych oraz numerycznych i analizy statystycznej uzyskanych rezultatów, których opis i wyniki są przedstawione w niniejszej rozprawie.

2. Zakres rozprawy

Rozprawa doktorska jest klasyczną naukową pracą łączącą badania eksperymentalne oraz numeryczny, a jej tytuł jest adekwatny do zawartych w niej treści. Układ rozprawy jest właściwy. Składa się ona z wprowadzenia oraz sześciu rozdziałów zawierających: analizę stanu wiedzy dotyczącej połączeń klejowych oraz nagniatanie dynamiczne, ocenę stanu zagadnienia i wnioski, temat, cel i program badań, metodykę badań, wyniki badań i ich analizę oraz podsumowanie i wnioski.

We Wprowadzeniu, przedstawiono wstęp do problematyki pracy.

Pierwszy rozdział zawiera analizę literatury dotyczącej połączeń klejowych, w tym informacje dotyczące podstawowych pojęć i mechanizmów konstituowania połączeń klejowych, metod przygotowania powierzchni do klejenia, wytrzymałości połączeń klejowych, wpływ temperatury na wytrzymałość połączeń klejowych, wpływu temperatury na wytrzymałość połączeń klejowych, wpływu cyklicznych zmian temperatury na wytrzymałość połączeń klejowych, wybranych metod zwiększania wytrzymałości połączeń klejowych.

W drugim rozdziale zawarto analizę literatury związaną z tematyką nagniatania dynamicznego, w tym klasyfikację metod nagniatania, charakterystykę procesu pneumokulkowania, wpływu nagniatania dynamicznego na strukturę geometryczną powierzchni oraz właściwości fizyczne warstwy wierzchniej, wpływ nagniatania

dynamicznego na właściwości użytkowe obrabianych przedmiotów, wpływ pneumokulkowania na wytrzymałość połączeń klejowych oraz metody kontroli prawidłowości przebiegu procesu nagniatania dynamicznego.

Trzeci rodzaj stanowi ocenę stanu zagadnienia i wnioski z niej płynące.

W czwartym rozdziale zamieszczono temat, cel i program badań.

Piąty rozdział poświęcony jest metodyce badań i zawiera 10 podrozdziałów w brzmieniu: metodyka planu doświadczeń Hartleya, charakterystyka materiałów, proces klejenia, proces pneumokulkowania, kontrola intensywności procesu pneumokulkowania, badanie struktury geometrycznej powierzchni, badanie stanu naprężeń własnych, badanie właściwości wytrzymałościowych, badanie charakteru zniszczeń połączeń klejowych, analiza MES połączeń klejowych.

W rozdziale szóstym zamieszczono wyniki badań i ich analizę, grupując je w pięć podrozdziałów, obejmujących badanie wpływu wybranych parametrów procesu pneumokulkowania na nośność połączeń klejowych, badanie wpływu wybranych parametrów procesu pneumokulkowania na intensywność obróbki, badanie wpływu wybranych parametrów procesu pneumokulkowania na strukturę geometryczną powierzchni, badanie wpływu wybranych parametrów procesu pneumokulkowania na stan naprężeń własnych oraz wyniki analizy MES połączeń klejowych.

W rozprawie przedstawiono także podsumowanie i wnioski oraz spis literatury.

Rozprawa składa się z 152 stron i zawiera 73 rysunki oraz 31 tabel. W rozprawie znajduje się również streszczenie w języku polskim (str. 151) i angielskim (str. 152), wykaz używanych w rozprawie skrótów (str. 4) oraz definicje określeń zastosowanych w rozprawie (str. 4), a także spis rysunków (str. 142) i spis tabel (str. 148). Cytowana literatura obejmuje 156 pozycji, przygotowanych bardzo starannie w porządku alfabetycznym i obejmuje publikacje polskie oraz pozycje zagraniczne w języku angielskim. W zestawieniu literatury ujęto m.in. 12 norm, w tym polskie (poz. 84-89) i zagraniczne (poz. 3-6), karty techniczne produktów (poz. 45), procedury (poz. 123). W wykazie literatury znajdują się trzy współautorskie publikacje Doktorantki (poz. 145,148,155).

W rozprawie Doktorantka nie ustrzegła się pewnych nieścisłości i nie uwzględniła niektórych informacji, które przedstawiono w punkcie 3 recenzji.

3. Ocena ogólna rozprawy

Analiza stanu wiedzy dotyczyła dwóch obszarów: procesu klejenia (rozdział pierwszy) oraz procesu nagniatania (rozdział drugi). W rozdziale pierwszym przedstawiono m.in. nie tylko założenia operacji przygotowania powierzchni materiałów przeznaczonych do klejenia, ale także charakterystykę różnych metod przygotowania powierzchni do klejenia. Moim zdaniem Doktorantka powinna oprócz ogólnych informacji dotyczących metod przygotowania powierzchni do procesu klejenia (zamieszczonych w podrozdziale 1.2. Metody przygotowania powierzchni do klejenia), odnieść się lub przedstawić metody przygotowania powierzchni, które są dedykowane aluminium i stopom aluminium, bowiem ten rodzaj materiału jest poddany analizie w dalszej części pracy. Zabrakło wskazania metod, które są często stosowane jako metody przygotowawcze stopów aluminium do klejenia i uzasadnienia w tym kontekście wykorzystanej w pracy metody nagniatania dynamicznego – pneumokulkowania. Ponadto moim zdaniem podrozdziały dotyczące wpływu temperatury i cyklicznych zmian temperatury (podrozdział 1.4. Wpływ temperatury na wytrzymałość połączeń klejowych oraz podrozdział 1.5. Wpływ cyklicznych zmian temperatury na wytrzymałość połączeń klejowych) nie są dopełniające w aspekcie tematyki rozprawy, ponieważ praca skupia się przede wszystkim na przygotowaniu powierzchni w aspekcie przede wszystkim zwiększenia nośności połączeń klejowych elementów ze stopu aluminium. W tym kontekście te dwa podrozdziały mogłyby zostać usunięte z części pracy bez wpływu na adekwatność analizy literatury związanej z problematyką rozprawy. Zamiast tych podrozdziałów Doktoranta powinna uwypuklić i przedstawić dyskusję wyników związaną stricte z zagadnieniami przygotowania powierzchni aluminium i stopu aluminium w kontekście zwiększania wytrzymałości połączeń klejowych. Oprócz tego Doktorantka w analizie literatury dotyczącej procesu klejenia powinna odnieść się także do zagadnienia nośności, nie tylko wytrzymałości połączeń klejowych, gdyż w tytule rozprawy wskazana jest nośność połączeń klejowych, a nie wytrzymałość. Te określenia powinny zostać doprecyzowane, co częściowo zamieszczono we Wprowadzeniu rozprawy.

Analiza stanu wiedzy pozwoliła na zapoznanie się zarówno z problematyką klejenia, jak i nagniatania. Moim zdaniem wybór tych obszarów jest komplementarny w aspekcie problematyki rozprawy, która ogólnie dotyczy opracowania wydajnej, w miarę nieskomplikowanej i skutecznej metody umacniania połączeń klejowych zakładkowych,

uwzględniając aspekt zwiększenia nośności połączeń klejowych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 oraz wpływ różnych czynników z tym związanych.

Ocena stanu wiedzy opisana w rozdziale trzecim pozwoliła na sformułowanie wniosków, na podstawie których wskazano pewne obszary badawcze, które są niezbyt szczegółowo opisane i niewystarczająco poznane. Pozwoliło to na sformułowanie problemu naukowego, jakim jest weryfikacja możliwości zwiększania nośności zakładkowych połączeń klejowych ze stopu aluminium oraz określenie sposobu przewidywania oraz kontroli efektów obróbki umacniającej. Dzięki temu możliwe było określenie celu pracy, hipotez badawczych oraz opracowanie planu badań. Ta część rozprawy nie budzi zastrzeżeń i jest opracowana w sposób klarowny.

Moim zdaniem przedstawiona analiza zagadnień związanych z dwoma obszarami rozprawy: (i) tematyką konstytuowania połączeń klejowych oraz metodami zwiększenia wytrzymałości połączeń klejowych poprzez m.in. przygotowanie powierzchni łączonych elementów i (ii) tematyką dotyczącą procesu nagniatania (w tym pneumokulkowania) oraz z wpływem nagniatania dynamicznego na różne właściwości, także na strukturę geometryczną powierzchni i właściwości fizyczne warstwy wierzchniej elementów łączonych poprzez klejenie, stanowi uzasadniony wybór tych obszarów w kontekście tematyki rozprawy doktorskiej. Pozwoliło to na zapoznanie się z problematyką zarówno procesu klejenia, jak i procesu nagniatania, wskazując na pewne obszary wiedzy, które nie są dostatecznie poznane, a są interesujące w aspekcie komplementarnej analizy obu wymienionych procesów podczas konstytuowania połączeń klejowych.

Wśród obszarów, w których wiedza jest niepełna i występują pewne „luki badawcze” Doktoranta wymieniła m.in. (i) brak określenia w literaturze związku pomiędzy nośnością połączeń klejowych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 poddanych pneumokulkowaniu i intensywnością procesu pneumokulkowania oraz strukturą geometryczną powierzchni po pneumokulkowaniu, a także (ii) brak propozycji metod, które mogłyby posłużyć do przewidywania nośności połączeń klejowych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 po pneumokulkowaniu oraz do oceny poprawności obróbki umacniającej, co ułatwiłoby realizację w/w procesu w zastosowaniach przemysłowych. Doktorantka przytoczyła również informacje na poparcie wskazanych obszarów, które zostały uzyskane w opublikowanych badaniach wstępnych, tj. (i) przy odpowiednim doborze parametrów obróbki, pneumokulkowania strefy zakładki może być stosowane do zwiększania nośności połączeń

klejowych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 oraz (ii) dowiedziono związek pomiędzy wytrzymałością na ścinanie i stanem naprężeń w warstwie wierzchniej strefy zakładki połączeń klejowych wykonanych ze stopu tytanu Ti6Al4V.

Informacje zamieszczone w rozdziale czwartym, będące konsekwencją oceny stanu zagadnienia moim zdaniem zostały przygotowane właściwie. Doktorantka sformułowała treść problemu badawczego oraz określiła cel pracy, hipotezę badawczą oraz przedstawiła plan badań. Wymienione elementy rozprawy są komplementarne i zrozumiałe. Na uwagę zasługuje przedstawienie bardzo czytelnej koncepcji badań, podzielonej na 8 racjonalnych etapów i pozwalającej na zobrazowanie konsekwencji prowadzonych badań, których realizacja doprowadza do weryfikacji hipotezy badawczej, osiągnięcia celów oraz sformułowania wniosków użytkowych i naukowych, a także określenie obszarów dalszych prac badawczych.

Piąty rozdział obejmuje przedstawienie metodyki badań, dzięki której możliwa jest realizacja poszczególnych etapów badań (przedstawionych w rozdziale 4). W podrozdziale 5.1 opisano metodę planu doświadczeń Hartleya ($PS/DS-P:Ha_k$), który posłużył do oceny istotności wpływu parametrów procesu (czynnikiem wejściowym były wybrane parametry pneumokulkowania: trzy czynniki ($k=3$), a czynnikiem wyjściowym – m.in. nośność połączeń klejowych). Opis i schemat realizacji doświadczeń przeprowadzonych zgodnie z planem Hartleya opisany jest w sposób czytelny i zrozumiały.

Jednakże nasunęło się pytanie dotyczące innego parametru procesu pneumokulkowania: czy odległość obrabianej próbki od dyszy dolnej będzie miała wpływ na stopień umocnienia powierzchni, czy też intensywność procesu pneumokulkowania? Czy taki parametr był rozważany podczas określania czynnika wejściowego w postaci zestawu parametrów pneumokulkowania?

Charakterystyka zastosowanych w doświadczeniu materiałów została opisana i wystarczająco uzasadniona w podrozdziale 5.2, tj. blachy ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 (z których wykonano połączenia klejowe) oraz kleju epoksydowego Loctite EA 3430. *W odniesieniu do wyboru materiału łączącego: do analizy został wybrany stop aluminium w stanie utwardzenia T3, tj. przesyconym, odkształconym na zimno i starzonym naturalnie (wg normy EN 515), czy rozważany był inny stan utwardzenia tego stopu? Na jakiej podstawie wybrano ten stan utwardzania stopu aluminium EN AW-2024?*

W podrozdziale 5.3 opisano poszczególne operacje procesu wykonania połączeń klejowych, takie jak: przygotowanie powierzchni próbek ze stopu aluminium za pomocą obróbki strumieniowo-ściernej (wraz z podaniem parametrów technologicznych tej obróbki) wraz z ich oceną chropowatości powierzchni, dokonaną poprzez pomiary wybranych parametrów chropowatości powierzchni. Jednak nie przedstawiono uzasadnienia wyboru tego rodzaju obróbki wraz z zastosowanymi parametrami technologicznymi tej obróbki. Jest to niejako konsekwencją wspomnianej wcześniej uwagi dotyczącej pewnego braku w części analizy literatury konkretnych informacji związanych z wyszczególnieniem sposobów przygotowania powierzchni, zalecanych podczas przygotowania do klejenia, aluminium i stopów aluminium. W tym podrozdziale zabrakło także przedstawienia bardziej szczegółowych informacji na temat odtłuszczenia po obróbce mechanicznej. Zabrakło również przedstawienia technologii mieszania składników, metody mieszania, ewentualnie rodzaju mieszadła, czy też stanowiska. Wprawdzie w podrozdziale 5.2 wspomniano o możliwościach wyboru sposobu mieszania, jednak nie wskazano konkretnych danych czy wyborów. Doktorantka przedstawiła informacje na temat wykorzystania przyrządu ustalającego, w którym umieszczano próbki połączeń klejowych, ale zabrakło nieco opisanego samego procesu ustalania połączeń klejowych (a częściowo wykonania), gdyż są to połączenia jednonakładkowe, podczas wykonania których konieczne jest zastosowanie odpowiedniego kształtu elementów wykonawczych przyrządu ustalającego lub dodatkowych elementów w celu uzyskania poprawnego kształtu połączeń klejowych jednonakładkowych, spełniających m.in. założenie równoległości łączonych elementów oraz jednakowej grubości spoiny klejowej (wzdłuż długości, a także szerokości). Nie uwzględniono także bardziej szczegółowych informacji na temat procesu utwardzania. W domniemaniu (na podstawie wartości temperatury) jest to proces jednostopniowy, przebiegający na „zimno”. Nie podano wilgotności podczas utwardzania. Na rys. 5.6 można zauważyć, że próbki połączeń klejowych wykonywane są w pakiecie, jednak nie wskazano ile jednocześnie połączeń jest wykonywanych. Moim zdaniem jest to nieco słabsza część rozdziału 5.

Opis przeprowadzonego procesu pneumokulkowania zamieszczono w podrozdziale 5.4. Przedstawiono (rys. 5.7) i opisano urządzenie do pneumokulkowania oraz schemat procesu pneumokulkowania (rys. 5.8) oraz przygotowaną próbkę połączenia klejowego do tego procesu, choć nie opisano sposobu zastosowania (zamocowania) osłon z tworzywa polimerowego i rodzaju tworzywa polimerowego. W tabeli 5.7 zamieszczono przyjęte

parametry pneumokulkowania, na podstawie opublikowanych wyników wstępnych Doktorantki, danych literaturowych oraz możliwości technicznych stanowiska do pneumokulkowania.

W kontekście badań doświadczalnych związanych z pneumokulkowaniem: jednym ze wskaźników umocnienia materiału jest wzrost mikrotwardości warstwy wierzchniej. Czy nie były rozważane badania także w kierunku ilościowego badania umocnienia warstwy wierzchniej materiału, które występuje podczas nagniatania dynamicznego, jakim w tym przypadku jest pneumokulkowanie?

Na początku tego podrozdziału wspomniano, że procesowi pneumokulkowania zostaną poddane także płytki Almena, ale zabrakło opisu tego rodzaju płytek. Podobna uwaga dotyczy informacji przedstawionych w kolejnym podrozdziale 5.5, ponieważ moim zdaniem zabrakło przedstawienia charakterystyki testu (próby) Almena, który wyjaśniałby celowość i istotę przeprowadzonego testu, przy czym w pracy jest przedstawiona norma, zgodnie z którą taki test został wykonany.

W części związanej z metodyką badań zamieszczono także opis: badań struktury geometrycznej powierzchni poprzez parametry 2D i 3D, zgodnie ze stosownymi normami (podr. 5.6), badania stanu naprężeń własnych metodą dyfrakcji rentgenowskiej (podr. 5.7), badania właściwości wytrzymałościowych poprzez przeprowadzeniu próby jednoosiowego rozciągania, zgodnie z normą PN-EN 1465 (podr. 5.8), a także analizę charakteru zniszczenia połączeń klejowych, wykorzystując normę PN-EN ISO 10365 (podr. 5.9). W przypadku wykonywania pomiarów parametrów chropowatości powierzchni 2D i 3D (podrozdział 5.6), wprowadzie określono długość odcinka pomiarowego ($l_n = 12,5 \text{ mm}$), jednak nie przedstawiono nieco bardziej szczegółowo wyboru wartości tego rodzaju odcinka, gdyż zgodnie z zaleceniami według PN-ISO 4288 PN-ISO 3274 odcinek pomiarowy (także odcinek elementarny i inne parametry) dobiera się raczej na podstawie parametru chropowatości R_t lub R_z ($> 10 \dots 50 \mu\text{m}$), a nie R_a , przy czym nie zamieszczono konkretnej informacji na temat „wstępnej oceny wartości parametru R_a ”. Oprócz tego zabrakło informacji dotyczących ilości próbek poddanych pomiarom, ilości wykonanych pomiarów, czy też miejsc/obszarów wykonywania pomiarów na próbce. Ponadto moim zdaniem podczas oceny charakteru zniszczenia połączeń klejowych Doktoranta powinna posłużyć się nomenklaturą zawartą w tej normie, podając ewentualnie w nawiasach oznaczenia sposobu zniszczenia, opisane w

normie PN-EN ISO 10365. Byłaby to bardziej pełniejsza ocena charakteru zniszczenia analizowanych połączeń klejowych.

W podrozdziale 5.10 przedstawiono analizę MES połączeń klejowych wykorzystując do tego oprogramowanie Ansys 16.2 oraz opisując cel tej analizy, wymiary geometryczne połączeń klejowych wraz z przedstawieniem wariantów analizowanych modeli MES. Jednakże moim zdaniem zabrakło: a) uzasadnienia przyjęcia dwóch wariantów połączeń klejowych różniących się długością zakładki (12,5 mm oraz 25 mm), b) uzasadnienia i przedstawienia schematu pneumokulkowania (strefy połączenia) na długości 25 mm w przypadku połączenia klejowego o długości zakładki 12,5 mm, przez co opis ten jest nieco niezrozumiały, c) informacji, czy warianty poddane analizie MES, zostały także wykonane w rzeczywistości, d) uzasadnienia przyjęcia wartości siły rozciągającej 4000 N, e) przedstawienia warunków brzegowych, f) charakterystyki materiałowej materiałów, g) informacji na temat sposobu utworzenia modelu numerycznego poszczególnych połączeń (rodzaju elementów przyjętych do modelowania łączonego materiału i kleju, ilości warstw zamodelowanej spoiny klejowej, sposobu łączenia ewentualnego różnych rodzajów elementów skończonych), wartości i rodzaju modułu sprężystości kleju, założonej liniowości kleju itp. Zgodnie z kartą charakterystyki tego kleju moduł sprężystości wzdłużnej wynosi 3210 MPa, a w pracy przyjęto 2000 MPa, przy czym nie podano jaki jest to rodzaj współczynnika sprężystości. Opisano przy tym metodykę zamodelowania efektu pneumokulkowania połączeń klejowych. Reasumując, podrozdział 5.10 jest opisany w sposób raczej ogólny, bez uwzględnienia niektórych dość istotnych informacji.

W rozdziale 6 zamieszczono obszerne wyniki badań, pogrupowane zgodnie z ogólną koncepcją badań zamieszczoną w rozdziale 4. W podrozdziale 6.1, przedstawiono wyniki badań mające na celu określenie wpływu trzech wybranych parametrów pneumokulkowania (czasu obróbki, średnicy kulek oraz ciśnienia sprężonego powietrza) na nośność połączeń klejowych z wykorzystaniem planu Hartleya (PS/DS-P:H₃). Zamieszczono tu zarówno wyniki pomiarów nośności połączeń, jak i ocenę charakteru zniszczenia połączeń klejowych, dokonując także analizy statystycznej uzyskanych wyników, z wykorzystaniem jednoczynnikowej analizy wariancji ANOVA, analizy regresji i korelacji. Moim zdaniem ta część pracy została przeprowadzona przez Doktorantkę w sposób kompetentny i wymagała przeprowadzenia dużej ilości badań i analiz oraz posiadania wiedzy w dziedzinie planowania

eksperymentu i analizy statystycznej wyników. Dzięki temu w końcowej części pracy sformułowane wnioski są poparte elementami wnioskania statystycznego.

Moja drobna uwaga dotyczy tego, że można byłoby zamieścić w metodyce badań informacje związane z założeniami przeprowadzonej analizy statycznej w tym rozdziale, zastosowanych analiz, testów itp. Oprócz tego w przypadku stosowania analizy wariancji ANOVA, warto byłoby przedstawić założenia testów ANOVA i nieco je przybliżyć lub wskazać, które testy wykorzystano wraz z ewentualnym uzasadnieniem. Ponadto porządkując można byłoby przedstawić przyjęte przedziały wartości bezwzględnych współczynnika korelacji liniowej Perarsona, gdyż w zależności od dziedziny nauki, przyjmowana jest różna interpretacja oceny korelacji, przy czym oczywiście korelacja przyjmuje zawsze wartości w zakresie $[-1, 1]$. I w odniesieniu do tej uwagi, podczas analizy wyników zabrakło interpretacji korelacji, gdyż Doktorantka podała najczęściej tylko wartość tego współczynnika.

Podobnie wysoko oceniam kolejny podrozdział 6.2 związany z określeniem wpływu wybranych parametrów procesu pneumokulkowania na intensywność obróbki, w którym także posłużono się planem Hartleya ($PS/DS-P:H_3$) oraz przeprowadzono analizę regresji i korelacji między wartością strzałki ugięcia płytek Almena i nośnością połączeń klejowych. Określenie wpływu wybranych parametrów procesu pneumokulkowania na strukturę geometryczną powierzchni (podrozdział 6.4) określoną parametrami chropowatości powierzchni 2D i 3D także wykonano stosując podobny algorytm oceny jak w poprzednich podrozdziałach. Wprawdzie w metodyce zabrakło informacji na temat ilości przeprowadzonych pomiarów poszczególnych parametrów chropowatości powierzchni, ale w tej części pracy ta informacja została zawarta. W rozdziale 6.4 także w podobny sposób dokonano oceny wpływu wybranych parametrów procesu pneumokulkowania na stan naprężeń własnych. Pewnym mankamentem w niektórych częściach rozdziału 6 jest brak informacji na temat ilości przeprowadzonych pomiarów, prób, czy też ilości wykorzystanych próbek do badań itd.

W podrozdziale 6.5 zamieszczono wyniki analizy MES połączeń klejowych w postaci rozkładów naprężeń (von Misesa, maksymalnych głównych, normalnych, prostopadłych do powierzchni spoiny klejowej, stycznych) w spoinach połączeń klejowych dla pięciu wariantów połączeń klejowych (Tabela 6.17), porównując warianty połączeń klejowych poddanych i niepodanych procesowi pneumokulkowania w dwóch wariantach stref. Uzyskane wyniki

obrazują jedynie zależności jakościowe, gdyż ocena ilościowa byłaby możliwa w przypadku uwzględnienia właściwości materiałowych, czy też zastosowania danych eksperymentalnych do weryfikacji modelu. Przy czym możliwe było określenie (na zasadzie porównawczej) ogólnego trendu związanego z wpływem pneumokulkowania na wytrzymałość połączeń klejowych. Moim zdaniem w przypadku stwierdzenia, że „Na podstawie rozkładów naprężeń w spoinach klejowych przedstawionych w tabeli 6.18-6.20 można stwierdzić, że naprężenia maksymalne występują na końcach długości zakładki. Z kolei minimalne są zlokalizowane w części środkowej spoiny.”, Doktorantka powinna odnieść się do literatury wskazując, że uzyskane wyniki analizy są potwierdzeniem istniejącej wiedzy w tym zakresie.

W kończącym rozprawę podsumowaniu przedstawiono w czytelny sposób etapy analizy wpływu procesu pneumokulkowania na nośność analizowanych połączeń klejowych, wskazując na kamienie milowe osiągnięte w poszczególnych etapach badań. Uważam, że istotnym osiągnięciem Doktorantki jest opracowanie modelu matematycznego pozwalającego opisać wpływ wybranych parametrów procesu pneumokulkowania na nośność połączeń klejowych oraz modeli matematycznych opisujących wpływ wybranych parametrów pneumokulkowania na wartość strzałki ugięcia płytek kontrolnych Almena oraz wartość wybranego parametru chropowatości powierzchni zastosowanego w badaniach stopu aluminium EN AW-2024-T3. Oprócz tego w pracy przedstawiono propozycję metody umożliwiającej przewidywanie oraz kontrolę efektów obróbki umacniającej za pomocą próby Almena, co uważam za nowatorskie podejście do przedstawionych w pracy zagadnień.

Uważam także, że cele rozprawy zostały osiągnięte, czego dowodem jest fakt, że analiza otrzymanych rezultatów umożliwiła udowodnienie postawionej w rozprawie hipotezy badawczej, zgodnie z którą, obróbka umacniająca strefy zakładki połączeń klejowych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3, zrealizowana metodą pneumokulkowania z odpowiednio dobranymi parametrami technologicznymi, pozwala zwiększyć ich nośność.

W pracy zamieszczono 14 wniosków o charakterze zarówno poznawczym, jak i naukowym, które sformułowano na podstawie wyników badań i ich analizy, wskazując w konkluzji na pozytywny wpływ procesu pneumokulkowania strefy zakładki połączeń klejowych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3.

4. Uwagi dotyczące edycji rozprawy

Rozprawa napisana jest w sposób przejrzysty, a na podkreślenie zasługuje duża staranność edycyjna, choć pojawiają się nieliczne błędy edycyjne oraz interpunkcyjne, które przedstawiono poniżej.

1. Na stronie 114, występuje błąd w numeracji tabeli (Tabela 6.6), do której odwołano się w tekście, gdyż w tabeli 6.6 przedstawiono „Wartości obliczone i krytyczne oraz ocena istotności współczynników równania regresji”.
2. Wydaje się, że na stronie 114, albo występuje błąd w numeracji wymieniowej tabeli (Tabela 6.13), albo nie zamieszczono takiej tabeli, gdyż w tabeli 6.13 znajdują się „Wartości obliczone i krytyczne oraz ocena istotności współczynników równania regresji”.
3. Str. 116. Na rys. 6.25 zabrakło doprecyzowania określenia osi X: Nr wariantu.....
4. Oznaczenia i określenie mierzonych parametrów chropowatości powierzchni przedstawiono zarówno w wykazie, jak i w teście pracy. Moim zdaniem nie było konieczności zamieszczania dokładnie takich samych wyjaśnień.
5. W całej pracy powinien być zastosowany prawidłowe oznaczenia stopnia, tj. [°].
6. Doktorantka powinna stosować wyrażenie „połączenia klejowe” (jako układ trzech materiałów: element łączony-klej-element łączony), a nie „złącza”.

Przedstawione powyżej nieliczne uwagi edycyjne i formalne nie obniżają wartości merytorycznej rozprawy.

5. Wnioski końcowe

Recenzowana rozprawa doktorska ma charakter oryginalnej pracy naukowej, integrującej w sposób zrównoważony elementy poznawcze i praktyczne. Została ona przedstawiona zgodnie z metodologią prowadzenia i prezentowania prac naukowych.

Wnioski sformułowane w rozprawie mają istotne znaczenie dla lepszego poznania zagadnień związanych z wpływem procesu pneumokulkowania na nośność połączeń klejowych wykonanych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 w aspekcie opracowania skutecznej metody umacniania zakładkowych połączeń klejowych.

Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych oraz analizie numerycznej i analizie statystycznej uzyskanych wyników możliwe było zrealizowanie przyjętych celów rozprawy a także udowodnienie postawionej w rozprawie hipotezy badawczej, zgodnie

z którą, obróbka umacniająca strefy zakładki połączeń klejowych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3, zrealizowana metodą pneumokulkowania z odpowiednio dobranymi parametrami technologicznymi, pozwala zwiększyć ich nośność. Ważnym osiągnięciem Doktorantki jest opracowanie modelu matematycznego pozwalającego opisać wpływ wybranych parametrów procesu pneumokulkowania na nośność połączeń klejowych oraz modeli matematycznych opisujących wpływ wybranych parametrów pneumokulkowania na wartość strzałki ugięcia płytek kontrolnych Almena oraz wartość wybranego parametru chropowatości powierzchni zastosowanego w badaniach stopu aluminium EN AW-2024-T3, a także przedstawienie propozycji metody umożliwiającej przewidywanie oraz kontrolę efektów obróbki umacniającej za pomocą próby Almena.

Na uznanie zasługuje obszerny i kompleksowy zakres różnego rodzaju badań, które były realizowane na różnych stanowiskach badawczych z wykorzystaniem specjalistycznego oprogramowania, które wymagały przy tym dużej wiedzy teoretycznej i praktycznej, a także wiedzy w dziedzinie planowania eksperymentu i analizy statystycznej wyników. Prace te są uzupełnione staranną edycją rozprawy.

W rozprawie w części metodologicznej pojawiły się pewne braki, czy też nieścisłości, ale pomimo przedstawionych pewnych uwag recenzowaną rozprawę doktorską Pani mgr inż. Eweliny Ozgi nt. „Wpływ procesu pneumokulkowania na nośność połączeń klejowych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3”, oceniam bardzo pozytywnie. Doktorantka w konsekwentny sposób zrealizowała przyjęte cele rozprawy, wskazując na możliwość opracowania modeli matematycznych opisujących wpływ wybranych parametrów procesu pneumokulkowania na nośność połączeń klejowych oraz modeli matematycznych opisujących wpływ wybranych parametrów pneumokulkowania na wartość strzałki ugięcia płytek kontrolnych Almena oraz wartość wybranego parametru chropowatości powierzchni zastosowanego w badaniach stopu aluminium EN AW-2024-T3, a także przedstawiła propozycję metody umożliwiającej przewidywanie oraz kontrolę efektów obróbki umacniającej za pomocą próby Almena.

Praca została wykonana na dobrym poziomie merytorycznym, ze względu zarówno na sposób jej wykonania, jak i zakres przeprowadzonych badań doświadczalnych, numerycznych oraz analizy statycznej, choć pojawiają się niewielkie zastrzeżenia dotyczące niektórych części rozprawy.

Przedstawiona do oceny praca doktorska, oprócz aspektów naukowych, ma duże znaczenie poznawczo-aplikacyjne, dzięki czemu uzyskane wyniki mogą posłużyć do zaimplementowania metody pneumokulkowania pewnych stref połączeń klejowych w zastosowaniach przemysłowych, a w efekcie stanowi cenne opracowanie w obszarze inżynierii mechanicznej.

Na podstawie szczegółowej analizy przedłożonej rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Eweliny Ozgi nt. „Wpływ procesu pneumokulkowania na nośność połączeń klejowych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3”, oceniam, że rozprawa ta spełnia warunki określone w ustawie z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym (Dz. U. z 2018, poz. 1668) w odniesieniu do rozpraw doktorskich. Upoważnia mnie to do przedstawienia wniosku o dopuszczenie Pani mgr inż. Eweliny Ozgi do dalszego procedowania przez Radę Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza.