

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

Lublin, dnia 13.01.2026 r.

Recenzja

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Katarzyny Łabno
pt.: „Analiza wpływu zmian geometrii elementów łączonych na właściwości
statyczne i zmęczeniowe konstrukcyjnych połączeń klejowych blach ze stopu
aluminium EN AW-2024-T3 oraz stali S235JR”**

Podstawą sporządzenia niniejszej recenzji jest pismo Pana Zastępcy Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza prof. dr hab. inż. Andrzeja Kawalca z dnia 26 listopada 2025 roku nr RM-530-05-01/2025 o powołaniu na recenzenta pracy doktorskiej Pani mgr inż. Katarzyny Łabno pt.: „Analiza wpływu zmian geometrii elementów łączonych na właściwości statyczne i zmęczeniowe konstrukcyjnych połączeń klejowych blach ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 oraz stali S235JR”, do którego dołączono egzemplarz rozprawy doktorskiej.

1. Cel, hipoteza i zakres rozprawy

Na podstawie dokonanej analizy stanu zagadnienia sformułowano problem badawczy, który dotyczy weryfikacji możliwości zastosowania modyfikacji konstrukcyjnych w celu zwiększenia nośności jednozakładkowych połączeń klejowych.

W pracy przedstawiono hipotezę badawczą w następującym brzmieniu: „Istnieje możliwość zwiększenia nośności oraz trwałości zmęczeniowej zakładkowego połączenia klejowego elementów z konstrukcyjnych stopów metali poprzez zmodyfikowanie geometrii złącza w strefie przykrawędziowej zakładki”.

Jako cel główny recenzowanej pracy przyjęto analizę wpływu modyfikacji konstrukcyjnych elementów klejonych (blach z wybranych stopów metali), poprzez zmianę geometrii strefy przykrawędziowej tych elementów, przyczyniającej się do zmiany rozkładu naprężeń na właściwości wytrzymałościowe połączeń adhezyjnych zarówno statyczne, jak i zmęczeniowe. Uwzględniono przy tym także zagadnienia technologiczne związane z możliwością wykonania zaplanowanych modyfikacji konstrukcyjnych strefy przykrawędziowej łączonych elementów. Jednym z celów dodatkowych była budowa właściwego modelu numerycznego analizowanych konstrukcyjnych połączeń klejowych.

W celu osiągnięcia przedstawionych celów rozprawy oraz weryfikacji hipotezy badawczej przyjęto zakres prac, obejmujący przygotowanie próbek połączeń klejowych, analizę powierzchni klejonych elementów, przygotowanie połączeń klejowych, badanie połączeń klejowych, analizę wyników oraz etap dotyczący modelowania numerycznego rozważanych połączeń klejowych.

Przedstawione etapy metodologii badań zrealizowano z wykorzystaniem zarówno badań eksperymentalnych, jak i numerycznych, których wyniki przyczyniły się do pozyskania wiedzy w przedstawionej w rozprawie problematyce badawczej, co pozwoliło na sformułowanie wniosków na temat osiągnięcia postawionych w rozprawie celów oraz weryfikacji hipotezy badawczej.

Zrealizowanie przyjętych celów rozprawy oraz zweryfikowanie sformułowanej hipotezy badawczej wymagały zarówno głębokiej analizy teoretycznej omawianej problematyki, jak też przeprowadzenia przez Doktorantkę wielu różnorodnych i obszernych badań eksperymentalnych oraz numerycznych, których opis i wyniki są przedstawione w niniejszej rozprawie.

2. Zakres rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska jest klasyczną naukową pracą konsolidującą badania eksperymentalne i analizę numeryczną oraz analizę statystyczną, a jej tytuł jest adekwatny do zawartych w niej treści. Układ rozprawy jest właściwy. Praca zawiera wstęp oraz sześć rozdziałów obejmujących: determinanty wytrzymałości konstrukcyjnych połączeń klejowych, cel, hipotezę i zakres pracy, analizę MES, przygotowanie próbek do badań eksperymentalnych, badania statyczne, badania zmęczeniowe oraz podsumowanie i wnioski.

Wstęp wprowadza do analizowanej problematyki rozprawy dotyczącej technologii klejenia i właściwości połączeń klejowych.

Pierwszy rozdział („Determinanty wytrzymałości konstrukcyjnych połączeń klejowych”) obejmuje charakterystykę zjawisk dotyczących procesu klejenia, opis czynników wpływających na wytrzymałość statyczną połączeń klejowych, informacje dotyczące wytrzymałości i trwałości zmęczeniowej oraz dynamicznej połączeń klejowych. W tym rozdziale zamieszczono także wiadomości na temat zastosowania metody numerycznej (MES) do opisu zjawisk zachodzących w obciążonych połączeniach klejowych oraz podsumowanie dokonanego przeglądu literatury.

W drugim rozdziale przedstawiono cel, hipotezę i zakres pracy.

Trzeci rozdział poświęcono analizie metodą elementów skończonych (MES) połączeń klejowych, w tym przedstawiając zarówno ogólną charakterystykę tej metody, jak i założenia dotyczące modelowania konkretnych połączeń klejowych, a także wyniki modelowania MES.

W czwartym rozdziale dokonano opisu przygotowania próbek do badań doświadczalnych (łączonych elementów oraz połączeń klejowych), w tym także metodykę zaplanowanych badań (pomiaru wybranych parametrów chropowatości powierzchni oraz pomiarów kąta zwilżania i określania wartości swobodnej energii powierzchniowej wraz z jej składowymi). Przedstawiono także wyniki w/w badań eksperymentalnych.

Rozdział piąty dotyczy badań statycznych, w którym opisano metodykę i wyniki tych badań zarówno dla połączeń klejowych blach stalowych, jak i połączeń klejowych blach ze stopu aluminium. W tym rozdziale zamieszczono także wyniki analizy statystycznej uzyskanych wyników badań.

Wyniki badań zmęczeniowych opisano w rozdziale 6.

W rozprawie przedstawiono także podsumowanie i wnioski oraz spis literatury.

Rozprawa składa się z 223 stron maszynopisu, w którym zawarto 112 rysunki oraz 74 tabele. W rozprawie znajduje się również streszczenie w języku polskim (str. 220) i angielskim (str. 222), wykaz ważniejszych oznaczeń stosowanych w rozprawie (str. 5) oraz spis rysunków (str. 207) i spis tabel (str. 215). Cytowana literatura obejmuje 125 pozycji, przygotowanych w porządku cytowania w tekście rozprawy i obejmuje publikacje polskie oraz pozycje zagraniczne w języku angielskim. W zestawieniu literatury ujęto m.in. 8 norm (poz. 31, 32, 84, 115-118, 120) oraz poradniki i informacje techniczne (poz. 48, 69), a także rozprawy doktorskie (poz. 67, 74, 80, 97, 114) i habilitacyjne (poz. 46/95).

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

3. Ocena ogólna rozprawy

Analiza stanu wiedzy (zamieszczona w rozdziale pierwszym) obejmowała, oprócz opisu ogólnych informacji dotyczących technologii klejenia i zjawisk występujących w procesie klejenia, przede wszystkim charakterystykę czynników wpływających na wytrzymałość połączeń klejowych. Uwagę zwrócono na rozkład naprężeń występujących w różnych rozwiązaniach konstrukcyjnych połączeń klejowych, pod wpływem działających obciążeń oraz opisano wpływ właściwości klejów na właściwości mechaniczne połączeń klejowych. W jednym z podrozdziałów pracy (1.2.4) przedstawiono informacje dotyczące wpływu konstrukcyjnych modyfikacji elementów klejonych na wytrzymałość połączeń klejowych. Podrozdział 1.3 poświęcony jest analizie literatury związanej z wytrzymałością i trwałością zmęczeniowej połączeń klejowych, w tym wybranych metod badań oraz czynników wpływających na ten rodzaj wytrzymałości oraz niektórych metod poprawy trwałości wytrzymałości i zmęczeniowej połączeń klejowych.

Przeprowadzona analiza literatury przedmiotowej pozwoliła na zapoznanie się z zagadnieniami dotyczącymi zarówno problematyki technologii klejenia, a w konsekwencji - wykonania połączeń klejowych, jak i zagadnień wytrzymałości statycznej i dynamicznej tego rodzaju połączeń oraz czynników determinujących wymienione rodzaje wytrzymałości. Uważam, że wybór zaprezentowanych obszarów w części teoretycznej jest właściwy i komplementarny z problematyką rozprawy przedstawioną w części badawczej.

W **rozdziale trzecim** zamieszczono metodykę analizy numerycznej metodą elementów skończonych oraz wyniki tej analizy dla trzech rodzajów połączeń klejowych (zróżnicowanych geometrią łączonych elementów) obciążonych na ścinanie. Przygotowano model połączenia klejowego bez zmienionej geometrii w strefie przykrawędziowej (model bazowy) oraz modele połączeń klejowych, w których łączone elementy posiadały wcięcia oraz otwory. W tekście przedstawiono wymiary jednozakładowego połączenia klejowego, natomiast nie zamieszczono żadnej informacji na temat wymiarów modyfikacji geometrycznych wykonanych w strefie przykrawędziowej łączonych elementów. Schematy i wymiary wariantów połączeń klejowych z modyfikacjami konstrukcyjnymi zamieszczono dopiero w rozdziale piątym. Dodatkowo nie określono jakie konkretne warianty połączeń klejowych zostały

poddane analizie numerycznej, w odniesieniu do wariantów zamieszczonych w rozdziale 5. Oznaczenia wariantów zamieszczono dopiero w podrozdziale dotyczącym wyników analizy MES (punkt 3.3), jednak nie podając uzasadnienia wyboru połączeń klejowych poddanych analizie MES. Warto byłoby także wskazać konkretne oznaczenia analizowanych wariantów połączeń klejowych, zgodne z oznaczeniami zastosowanymi w badaniach eksperymentalnych.

Odnosząc się do wyników badań zaprezentowanych w rozdziale trzecim, przedstawiono w nim wartości maksymalnych naprężeń w spoinach połączeń klejowych blach stalowych i blach ze stopu aluminium dla różnych wariantów połączeń w zależności od kształtu geometrycznego łączonych elementów w strefie przykrawędziowej (m.in. zestawienie wyników zamieszczono w tabelach 3.12 i 3.13). Jednakże nie porównano takich samych modyfikowanych konstrukcyjnie wariantów połączeń klejowych dla połączeń blach stalowych oraz blach ze stopu aluminium, czy też nie uzasadniono przyjętych różnych wariantów połączeń klejowych (pod względem zmiennej geometrii w strefie przykrawędziowej łączonych elementów) analizowanych materiałów konstrukcyjnych. Doktorantka w podrozdziale 3.2 przedstawiła, że „Wartość obciążenia przyjętego do obliczeń była równa nośności połączeń, którą otrzymano w badaniach eksperymentalnych”. Na podstawie powyższych uwag, uważam, że wybrana część badań eksperymentalnych powinna zostać umieszczona przed analizą numeryczną, np. jako badania wstępne lub komplementarne do analizy numerycznej. Ewentualnie konieczne byłoby odniesienie się do konkretnych wyników zamieszczonych w dalszej części pracy. Oprócz tego w podrozdziale 3.2 nie opisano, w jaki sposób określono przyjęte parametry materiałowe kleju i materiałów łączonych. Czy zostały one zaczerpnięte z literatury, czy też określone na podstawie badań własnych.

Podsumowując rozdział trzeci, Doktorantka powinna uzasadnić informacje dotyczące wyboru konkretnych rozwiązań geometrycznych połączeń klejowych poddanych analizie numerycznej i wskazać nawiązanie do konkretnych wyników badań doświadczalnych, być może zrealizowanych, jako badania wstępne. Dodatkowo warianty geometryczne w postaci schematów i wymiarów powinny zostać przedstawione na początku tego rozdziału, które są kontaktybilne (także w oznaczeniach) z analizowanymi wariantami połączeń klejowych w badaniach doświadczalnych. Oczywiście idea wykonania jako pierwszej analizy numerycznej, stanowiąca wstęp do rozważanego zagadnienia w dalszych częściach pracy

(pod względem rozpatrywanego rozkładu naprężeń w strefie przykrawędziowej zakładki połączeń klejowych) jest słuszna, ale niektóre informacje powinny być uzupełnione lub powinny być wskazane odniesienia/odwołania się do odpowiednich danych z dalszej części pracy – badań eksperymentalnych.

W rozdziale czwartym dokonano opisu właściwości łączonych materiałów, zastosowanego kleju epoksydowego dwuskładnikowego, sposobu przygotowania powierzchni próbek łączonych materiałów, proces wykonania połączeń klejowych oraz przedstawiono metodyki pomiarów wybranych parametrów chropowatości powierzchni i określenia wartości swobodnej energii powierzchniowej i jej składowych na podstawie pomiarów kąta zwilżania.

Podczas opisu sposobu przygotowania powierzchni w odniesieniu do zastosowanego materiału ściernego do obróbki strumieniowo-ściernej myślę, że warto doprecyzować słownictwo, a dotyczy to „elektrokorundu” i „korundu glinowego”. Korund jest to tlenek glinu, więc zbyteczny jest przymiotnik „glinowy”, przy czym korund jest to naturalny minerał, a elektrokorund jest wytwarzany syntetycznie oraz posiada nieco inne właściwości i skład chemiczny. Warto więc uściślić, jaki materiał został wykorzystany podczas obróbki strumieniowo ścierniej. Dodatkowo nawiązując do procesu odtłuszczania, nie umieszczono opisu zarówno metody odtłuszczania, jak i parametrów technologicznych tego procesu.

W tym rozdziale wymaga wyjaśnienie, czy też doprecyzowanie wiadomości dotyczących zastosowania obróbki strumieniowo-ścierniej, jako metody przygotowania powierzchni łączonych materiałów do klejenia, gdyż przedstawione są odmienne informacje dotyczące tego procesu w podrozdziale 4.2 i 4.4. Na stronie 97 przedstawiono następujący opis: *„Obróbkę strumieniowo-ścierną przeprowadzono korundem glinowym w formie F40 przy ciśnieniu 0,8 MPa używając dyszy o średnicy 6 mm. Odległość dyszy od próbki to 150 mm oraz czas obróbki to 60 s”*, natomiast na str. 99 zamieszczono opis w następującej formie: *„Obróbkę przeprowadzono z wykorzystaniem elektrokorundu 95A o średniej wielkości ziarna równej 0,27 mm pod ciśnieniem 0,8 MPa. Czas obróbki wynosił 20s natomiast odległość dyszy od powierzchni blach około 100 mm”*. W nawiązaniu do przedstawionych fragmentów tekstu, występują różnice zarówno w rodzaju materiału ściernego i jego rozmiarów, jak i parametrów obróbki strumieniowo-ścierniej, co prowadzi do pewnych nieścisłości odnośnie charakterystyki zastosowanej metody przygotowania powierzchni łączonych materiałów.

W metodyce badań nie zamieszczono pełnej specyfikacji kleju np. rodzaju utwardzacza, stosunku mieszania obu składników kleju, czy też czasu, jaki upłynął od chwili ostatniego etapu przygotowania powierzchni do chwili aplikacji kleju na łączoną powierzchnię oraz danych dotyczących wilgotności powietrza. Wprawdzie zamieszczono zdjęcie przyrządu do klejenia próbek (rys. 4.2), ale nie przedstawiono informacji dotyczącej ilości jednocześnie wykonywanych próbek połączeń klejowych oraz ilości przygotowanych połączeń dla każdego z analizowanych wariantów połączeń klejowych.

Odnosząc się do opisu związanego z określeniem wartości swobodnej energii powierzchniowej (SEP) i jej składowych na podstawie pomiarów kąta zwilżania, moim zdaniem informacje te zostały przedstawione bardzo ogólnie i w tekście nie zawarto istotnych wiadomości, pozwalających na ocenę poprawności metodyki pomiaru kąta zwilżania, czy też określenia wartości SEP. Przedstawiono metodę określenia wartości SEP tj. metodę Owens-Wendta, która jest jedną z często stosowanych metod określenia wspomnianej wielkości w odniesieniu do powierzchni metali. Zastosowano także dwie cieczy pomiarowe: wodę destylowaną i diiodometan, co jest oczywiście poprawnym działaniem dla wybranej metody określania SEP, jednakże nie zamieszczono informacji dotyczących zarówno uzasadnienia objętości kropli cieczy pomiarowych, jak i czasu jej przebywania na analizowanej powierzchni, a jest to niezwykle istotne ze względu na histerezę kąta zwilżania, a w zasadzie jedną ze składowych - histerezę dynamiczną. Doktoranta wspomniała o drugiej składowej histerezy kąta zwilżania, wynikającej z chropowatości powierzchni, jednakże nie zaprezentowano żadnej dyskusji na ten temat, czy ewentualnego odniesienia się do wyników SEP analizowanych materiałów, uzyskanych przez innych autorów. Nie przedstawiono także charakterystyki metody pomiaru kąta zwilżania, ilości mierzonych kropeł, rodzaju mierzonego kąta zwilżania, ilości pomiarów, czasu pomiaru, który upłynął od chwili aplikacji kropli na powierzchnię, odległości osadzania kropli na powierzchni itp. W tabeli 4.8 przedstawiono wyniki obliczeń wartości SEP i jej składowych, ale nie w tej części pracy nie zawarto informacji dotyczącej wartości swobodnej energii powierzchniowej i jej składowych zastosowanych cieczy pomiarowych, a także odpowiadającym im warunkom pomiaru kąta zwilżania (temperatura i wilgotność). Oprócz tego uważam, że wartości kąta zwilżania cieczy pomiarowych powinny zostać przedstawione w pracy. Doktorantka przedstawiła w tabeli 4.8 wartości średnie i odchylenia standardowe obliczonych wartości SEP i jej składowych dla

obu badanych materiałów, jednakże nie umieszczono informacji związanych z ilością pomiarów kąta zwilżania, na podstawie których określono te wartości SEP.

Podsumowując wyniki wykonane w tym rozdziale 4, dokonana charakterystyka właściwości powierzchni, określona poprzez różne parametry chropowatości powierzchni oraz wartości SEP i jej składowych, stanowi element opisujący powierzchnię łączonych materiałów.

Rozdział piąty poświęcony jest badaniom statycznym, w którym opisano metodykę tych badań, charakterystykę badanych pięciu wariantów połączeń klejowych (wariant bazowy i cztery warianty modyfikowane) oraz przedstawiono wyniki tych badań. Moim zdaniem w celu bardziej czytelnego układu tego rozdziału, w pierwszej części powinna zostać przedstawiona geometria i opis wariantów połączeń klejowych poddanych analizie, w dalszej kolejności metodyka wykonanych badań, a w oddzielnym podrozdziale powinny zostać zaprezentowane wyniki badań.

W opisie badań i połączeń klejowych nie przedstawiono literalnie ilości wykonanych próbek tych połączeń w każdym z analizowanych wariantów, a dopiero na stronie 111 umieszczono opis, „Dla każdego wariantu wykonano po cztery powtórzenia”, który powinien być bardziej doprecyzowany i dotyczący raczej ilości wykonanych próbek, a nie powtórzeń, gdyż pomiar dotyczy pojedynczego połączenia klejowego. Natomiast w tabelach prezentujących wyniki badań wytrzymałościowych połączeń klejowych blach stalowych zamieszczono dla wariantu bazowego wyniki dla 10 próbek (Tabela 5.10), a dla pozostałych wariantów (Tabele 5.11 – 5.14) zawarto wyniki dla 5 próbek. W przypadku połączeń klejowych blach ze stopu aluminium określono wytrzymałość dla 6 próbek wariantu bazowego tych połączeń (Tabela 5.20), a w pozostałych wariantach dla 5 próbek (Tabele 5.21 – 5.24). Myślę, że konieczne jest doprecyzowanie przedstawionych wyżej nieścisłości dotyczących ilości połączeń poddanych badaniom wytrzymałościowym.

Uważam także, że warto byłoby przedstawić opis technologii wykonania modyfikacji elementów łączonych i ewentualną dokładność wymiarową wykonanych próbek. Oprócz tego podczas objaśnienia przebiegu próby wytrzymałościowej, powinien znaleźć się opis dotyczący odniesienia się do zachowania współosiowości próbek połączeń klejowych podczas badań wytrzymałościowych, zamocowanych w szczękach maszyny wytrzymałościowej.

Podczas oceny charakteru zniszczenia połączeń klejowych po badaniach wytrzymałościowych, warto powołać się na normę, na podstawie której dokonano oceny charakteru zniszczenia połączeń klejowych.

Zamieszczona w rozdziale piątym analiza makroskopowa próbek stanowi cenne uzupełnienie badań wytrzymałości na ścinanie połączeń klejowych (badań statycznych). Dzięki niej możliwa była analiza pęknięć badanych wariantów połączeń, w których występowało zróżnicowanie geometryczne krawędzi łączonych elementów, i zauważenie wpływu modyfikacji geometrycznych na mechanizm pęknięcia połączeń klejowych. Pewnym mankamentem rozdziałów dotyczących analizy faktograficznej (5.4 i 5.5) brak jest opisu metodyki przeprowadzenia tej analizy, przedstawiając m.in. sposób wyboru próbek do analizy, ilości pomiarów, zastosowane urządzenia do wykonania zdjęć itp.

W rozdziale piątym dokonano także analizy statystycznej uzyskanych wyników badań wytrzymałości statycznej. Do tego celu wykorzystano test t Studenta, analizę wariancji ANOVA oraz analizę regresji i korelacji, a także analizę Boxplot. Uważam, że przeprowadzenie takiej analizy (przy zastosowaniu metod opisowych i wnioskowań) pozwala na uwiarygodnienie wyników i wskazanie pewnych zależności i trendów na przyjętym poziomie ufności, uwzględniając statystykę wyników. Drobną uwagę dotyczy tego, że w pracy powinno zostać przedstawione w sposób bardziej szczegółowy założenia testów i analiz, np. w przypadku zastosowania testu t Studenta określenie hipotez statystycznych, czy też wskazanie uzyskania rozkładu normalnego wyników.

Konkludując powyższe uwagi, 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 wnioskowania statystycznego. Jednakże uważam, że Doktoranta powinna uwypuklić wnioski sformułowane na podstawie uzyskanych wyników, które stanowiłyby podstawę wyboru wariantów połączeń klejowych do dalszych badań dynamicznych tych połączeń.

W rozdziale szóstym zaprezentowano krótki opis sposobu przeprowadzenia badań zmęczeniowych oraz wyniki tych badań dla wybranych wariantów połączeń klejowych. Pomimo interesujących badań, dla których przeprowadzono analizę statystyczną, uważam, że opis analizowanych wariantów jest niepełny i niekonsekwentny. Pewnym mankamentem tego rozdziału jest fakt, że nie zamieszczono informacji na temat oznaczenia konkretnego

wariantu połączeń, który poddano badaniom zmęczeniowym, podając tylko ogólny opis („(...) przedstawiono wyniki badań zmęczeniowych dla rozważanych wariantów z modyfikacjami poprzez wykonanie wcięcia na krawędzi czołowej połączenia klejowego.”) oraz oznaczenie wariantów, np. („(...) dla połączenia z wcięciami szerokimi w wariacie SWD”). Przykładowo, nie wskazano konkretnego wariantu WD z rozdziału 5 (Tabela 5.1) poddanego badaniom zmęczeniowym, gdyż nie umieszczono przyjętego oznaczenia wariantu połączeń klejowych. Uwaga ta dotyczy także pozostałych wariantów połączeń klejowych, które poddano badaniom dynamicznym. Nie zamieszczono również informacji na temat ilości próbek połączeń klejowych w poszczególnych wariantach poddanych badaniom wytrzymałościowym. Nie określono, co oznaczają wyrażenia w tabelach „poszczególne próbki”. Ponadto z powyższą uwagą związany jest brak uzasadnienia wyboru konkretnych wariantów połączeń poddanych badaniom zmęczeniowym, w porównaniu do wariantów poddanych badaniom wytrzymałości statycznej, o czym wspomniano także w ocenie rozdziału piątego.

W rozdziale szóstym (podrozdział 6.2 oraz podrozdział 6.4) zaprezentowano również wyniki analizy makroskopowej, które wykonano przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM). Uważam te części pracy, jako ważne uzupełnienie badań niszczących, które pozwalają na pełniejszą ocenę wpływu modyfikacji elementów łączących na mechanizm pękania połączeń klejowych. Natomiast drobna uwaga dotyczy pewnych nieścisłości terminologicznych zarówno tytułów podrozdziałów, jak i opisów w tych rozdziałach, gdyż zgodnie z jedną z definicji: badania makroskopowe polegają na obserwacji okiem nieuzbrojonym lub przy powiększeniach, które nie przekraczają powiększeń 30-krotnych. Natomiast w podrozdziałach 6.2 i 6.4 zamieszczono opis badań, do wykonania których wykorzystano skaningowy mikroskop elektronowy (SEM) oraz, jak wspomniano w przypisie, powiększenie do 150 000 x, więc moim zdaniem w podrozdziałach tych, większość badań dotyczy badań mikroskopowych.

W kończącym rozprawę „**Podsumowaniu i wnioskach**” przedstawiono w czytelny sposób etapy analizy wpływu modyfikacji konstrukcyjnej czołowej krawędzi elementów łączonych, tworzących połączenia klejowe, na wytrzymałość statyczną i zmęczeniową jednozakładkowych połączeń klejowych blach stalowych i stopu aluminium. Zamieszczono także sformułowane na podstawie trzech etapów badań wnioski. Analiza wyników badań pozwoliła na udowodnienie postawionej hipotezy badawczej.

Podsumowując recenzowaną rozprawę doktorską należy docenić i wskazać na duży zakres badań doświadczanych, uzupełniony analizą statyczną oraz wykonanie także analizy numerycznej, jako komplementarnej części pracy. Badania te stanowią cenne uzupełnienie dotychczasowej wiedzy z zakresu technologii klejenia i wykonywania połączeń klejowych w aspekcie nośności i wytrzymałości połączeń klejowych nie tylko statycznej, ale także zmęczeniowej. Przedstawione w pracy zagadnienia koncentrują się na analizie zmiany charakteru rozkładu naprężeń w obszarze spoiny klejowej poprzez możliwe technologicznie modyfikacje konstrukcyjne łączonych elementów w strefie przykrawędziowej zakładki połączeń klejowych, które to niektóre modyfikacje wpływają na zwiększenie wytrzymałości statycznej i zmęczeniowej analizowanych połączeń. Wiedza ta może być wykorzystana podczas konstruowania, wykonywania oraz eksploatacji połączeń klejowych uwzględniając również aspekt ekonomiczny i ekologiczny technologii klejenia. Jednakże zabrakło w poszczególnych rozdziałach podsumowania poszczególnych badań. Moim zdaniem koncepcja analiz i badań jest spójna oraz logiczna, jednakże zabrakło podkreślenia logicznego ciągu wniosków z badań lub analiz poprzedzających, które stanowiłyby uzasadnienie kontynuacji dalszych badań lub dokonania wyboru określonych wariantów połączeń klejowych. W analizie numerycznej nie uzasadniono wyboru analizowanych wariantów połączeń. W pracy zamieszczono jako pierwszy etap badań – analizę numeryczną odwołując się do geometrii połączeń klejowych, jako „warunków brzegowych z badań eksperymentalnych” podczas gdy wszelkie informacje na ten temat, łącznie z wymiarami geometrycznymi zamieszczono dopiero w następnym podrozdziale. Oprócz tego nie uzasadniono wyboru wariantów połączeń klejowych do trzeciego etapu badań – badań wytrzymałości zmęczeniowej. Z tego względu, przygotowanie wniosków płynących z każdego etapu badań pozwoliłyby na bardziej klarowne przedstawienie uzasadnienia przyczynowo-skutkowego wykonanych badań oraz późniejszych sformułowanych wniosków.

Przeprowadzona analiza statystyczna wyników badań eksperymentalnych wytrzymałości statycznej (wytrzymałości na ścinanie) i dynamicznej (zmęczeniowej) wymagała nie tylko przeprowadzenia dużej ilości badań i analiz oraz posiadania wiedzy w dziedzinie planowania eksperymentu, ale również wiedzy dotyczącej analizy statystycznej wyników. Takie podejście przyczyniło się do tego, że sformułowane końcowe wnioski zostały poparte elementami wnioskowania statystycznego.

W pracy zaprezentowano 7 wniosków o charakterze zarówno poznawczym, jak i utylitarnym, które opracowano na podstawie wyników badań eksperymentalnych oraz analizy numerycznej, wskazując w podsumowaniu na pozytywny wpływ modyfikacji konstrukcyjnych łączonych elementów przede wszystkim na wytrzymałość zmęczeniową, na możliwość redukcji wymiarów konstrukcji, czy też mniejsze zużycie materiałów konstrukcyjnych.

Reasumując, uważam, że cel rozprawy został osiągnięty, czego dowodem jest fakt, że analiza otrzymanych rezultatów umożliwiła udowodnienie postawionej w rozprawie hipotezy badawczej, zgodnie z którą wykonanie wcięć oraz perforacji w strefie przykrawędziowej jednozakładkowego połączenia klejowego ma wpływ na nośność połączenia, zwłaszcza w aspekcie wytrzymałości zmęczeniowej.

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 36, występuje błąd w numeracji odniesienia do wzoru, gdyż powinno być: Wzór (1.41) określa współczynnik β (...).
2. Nie odniesiono się do niektórych zależności zamieszczonych w tekście.
3. Pewne wyrazy zostały przedstawione w niepoprawnej formie, np. „nie co” (str. 173)
4. Na stronie 93 powinno być 1,4% manganu.
5. W podrozdziale 4.4 wydaje się, że występuje błąd numeracji rysunków i odniesienia się do rys. 4.6, gdyż w podrozdziale 4.4. rys. 4.6 nie istnieje, a urządzenie do pomiaru chropowatości powierzchni zaprezentowano na rys. 4.3. Ponadto skrót „SGP” w opisie rysunku 4.3 powinien zostać albo wyjaśniony w tekście, albo np. w wykazie oznaczeń.
6. Moim zdaniem nie jest konieczne umieszczanie wyjaśnienia oznaczeń wszystkich analizowanych parametrów chropowatości 3D, zarówno w tekście (str. 99), jak i w wykazie oznaczeń.
7. Tabela 4.8 (str. 108) W większości przypadkach odchylenie standardowe podaje się z taką samą liczbą miejsc po przecinku w odniesieniu do średniej arytmetycznej lub też z jedną cyfrą znaczącą mniej dostosowując do rzędu wielkości, więc przedstawienie

wartości odchylenia standardowego z większą ilością cyfr po przecinku nie jest uzasadnione w przypadku obliczeń zamieszczonych w tabeli 4.8.

8. Na str. 173 nie doprecyzowano wyrażenia: „przedstawionych poniżej przełomach zmęczeniowych”, gdyż takie przełomy nie zostały poniżej zaprezentowane.
9. W tekście występują drobne przejęzyczenia, np. „zniżeniu adhezyjno-kohezyjnym” (str. 175).
10. Na rys. 6.7 - 6.9 informacje dotyczące powiększenia czy też skali są nieczytelne.
11. Doktorantka powinna stosować wyrażenie „połączenia klejowe” (jako układ trzech materiałów: element łączony-klej-element łączony), a nie „złącze” .
12. W przypadku niektórych pozycji literaturowych:
 - a) przedstawiono niepełne dane bibliograficzne (np. poz. 23, 28, 33, 76, 85, 89, 121),
 - b) brak jest danych pozwalających na pełną identyfikację danej pozycji literaturowej (np. poz. 87),
 - c) nie podano daty dostępu do informacji zamieszczonych na stronach internetowych (poz. 63, 69),
 - d) występuje różny sposób zapisu tytułu tego samego czasopisma (np. por. poz. 15, 20 i 86 itp.),
 - e) ta sama pozycja występuje pod różnymi numerami w bibliografii (poz. 46 i 95).

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 zagadnienia eksperymentalne i modelowanie numeryczne. Została ona przedstawiona zgodnie z metodologią przeprowadzania i prezentowania prac naukowych.

Wnioski sformułowane w rozprawie mają istotne znaczenie dla lepszego poznania zagadnień związanych z wpływem modyfikacji konstrukcyjnych elementów będących elementami składowymi połączenia klejowego na właściwości wytrzymałościowe statyczne i zmęczeniowe połączeń klejowych.

Elementem nowości zaprezentowanych badań w pracy była analiza połączeń klejowych poddanych badaniom wytrzymałości zmęczeniowych, w których to połączeniach łączone

elementy (wykonane z blach stalowych oraz ze stopu aluminium) poddano konstrukcyjnym modyfikacjom polegającym na wykonaniu nacięć i otworów na czołowych krawędziach tych elementów, uzyskując dzięki temu zmiany konstrukcyjne w strefie przykrawędziowej zakładki połączeń klejowych.

Na podstawie uzyskanych wyników dokonanych badań eksperymentalnych, ich analizie statystycznej oraz analizie numerycznej możliwe było zrealizowanie przyjętych celów rozprawy a także udowodnienie postawionej w rozprawie doktorskiej hipotezy badawczej, zgodnie z którą istnieje możliwość zwiększenia nośności oraz trwałości zmęczeniowej zakładkowego połączenia klejowego elementów z konstrukcyjnych stopów metali poprzez zmodyfikowanie geometrii połączenia (klejonych elementów) w postaci zastosowania wcięć i perforacji w strefie przykrawędziowej zakładki spoiny klejowej.

Ważnym osiągnięciem Doktorantki jest wykazanie, że zastosowane modyfikacje geometryczne elementów łączonych w strefie przykrawędziowej zakładki wpływają znacząco na wzrost trwałości zmęczeniowej połączeń klejowych, natomiast w przypadku wytrzymałości statycznej tylko wybrane rozwiązania geometryczne łączonych blach umożliwiają poprawę tej wytrzymałości, przy czym uwzględniono także możliwości technologiczne wykonania modyfikacji geometrycznych łączonych elementów. Wnioski te zostały także poparte analizą statystyczną uzyskanych wyników, co przyczynia się do uwiarygodnienia sformułowanych wniosków. Analiza makroskopowa i mikroskopowa stanowiły cenne uzupełnienie badań niszczących, umożliwiając dodatkową ocenę charakteru zniszczeń oraz rozkład pęknięć na powierzchni łączonych elementów, stanowiących elementy składowe połączeń klejowych, po badaniach wytrzymałościowych.

Moim zadaniem należy także docenić wykonanie badań zmęczeniowych, z tego powodu, że proces zmęczenia jest jedną z przyczyn zbyt wczesnego zniszczenia konstrukcji, gdyż naprężenia cykliczne przyczyniają się do skrócenia czasu eksploatacji maszyn. Poznanie więc wiadomości na temat inicjowania pęknięć i rozkładu naprężeń jest istotne z punktu widzenia poprawnego projektowania połączeń klejowych w aspekcie także trwałości zmęczeniowej.

Na uznanie zasługuje obszerny i kompleksowy zakres różnego rodzaju badań i analiz, które były wykonywane na różnorodnych 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 nieścisłości, ale pomimo przedstawionych pewnych uwag krytycznych recenzowaną rozprawę doktorską Pani mgr inż. Katarzyny Łabno pt.: „Analiza wpływu zmian geometrii elementów łączonych na właściwości statyczne i zmęczeniowe konstrukcyjnych połączeń klejowych blach ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 oraz stali S235JR” oceniam pozytywnie. Doktorantka w konsekwentny sposób zrealizowała przyjęte cele rozprawy, wskazując na możliwość poprawy wytrzymałości statycznej i zmęczeniowej połączeń klejowych poprzez wybrane modyfikacje konstrukcyjne łączonych materiałów w strefie przykrawędziowej jednozakładkowych połączeń klejowych.

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

Przedstawiona do oceny praca doktorska, oprócz aspektów naukowych, ma także znaczenie poznawczo-aplikacyjne, dzięki czemu uzyskane wyniki mogą posłużyć do projektowania połączeń klejowych, znajdujących zastosowanie w wielu branżach przemysłowych, w aspekcie zwiększania ich wytrzymałości, zwłaszcza zmęczeniowej, dzięki czemu możliwa jest redukcja wymiarów konstrukcji i zużycia materiałów. W efekcie rozprawa ta stanowi cenne opracowanie w obszarze inżynierii mechanicznej.

Na podstawie szczegółowej analizy przedłożonej rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Katarzyny Łabno pt.: „Analiza wpływu zmian geometrii elementów łączonych na właściwości statyczne i zmęczeniowe konstrukcyjnych połączeń klejowych blach ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 oraz stali S235JR” stwierdzam, 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. Katarzyny Łabno do dalszego procedowania przez Radę Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza.