

**Recenzja**  
**rozprawy doktorskiej mgr. inż. Katarzyny Łabno**

**„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”**

Recenzję wykonano na podstawie pisma Zastępcy Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej prof. dr. hab. inż. Andrzeja Kawałca oraz „Umowy o dzieło nr NN-530-39/2025 (2) na wykonanie recenzji rozprawy doktorskiej”.

**I. Uwagi wstępne**

Przedstawiona do recenzji praca obejmuje:

- 223 stron oprawionych w książkę formatu A4,
- 113 ponumerowanych rysunków,
- 74 ponumerowane tabele,
- bibliografię liczącą 125 ponumerowanych pozycji krajowych i zagranicznych (w tym żadnych pozycji Doktorantki), jednak rzeczywista liczba pozycji literaturowych to 114, ponieważ z nieznanymi mi powodów Doktorantka nadawała niektórym pozycjom literaturowym różne numery.

Zasadnicza część rozprawy zawarta jest w rozdziałach 1-7. Wstęp rozprawy ma formę wprowadzenia do identyfikacji jej tematyki badawczej oraz ogólnie charakteryzuje połączenia klejowe, przywołując powody ich stosowania oraz wstępnie opisując istotne cechy i warunki konstytuowania tych połączeń. Podstawowa część rozprawy została zwieńczona wnioskami stanowiącymi podsumowanie podjętego wysiłku badawczego Doktorantki.

Rozprawa została, z pewnymi zastrzeżeniami, napisana dość poprawnym językiem i spełnia standardy stawiane rozprawom doktorskim. Zwraca jednak uwagę znaczna liczba błędów edytorskich i stylistycznych w tekście rozprawy, co znacznie utrudnia jej zrozumienie.

Układ samej pracy jest przejrzysty, a podział treści rozprawy na rozdziały i podrozdziały nie budzi większych zastrzeżeń. Terminologia i pojęcia stosowane w pracy są zasadniczo poprawnie zdefiniowane, jednak Autorka nie uniknęła błędów i uogólnień, zamiennego stosowania pojęć, np. waga i masa, czy nieprecyzyjnego użycia nazwenictwa z obszaru wytrzymałości materiałów. Materiały graficzne oraz tabele zamieszczone w pracy, w większości w sposób właściwy i czytelny przedstawiają rozważania Doktorantki dotyczące badania wpływu zmian geometrii elementów łączonych na właściwości statyczne i zmęczeniowe konstrukcyjnych połączeń klejowych.

## II. Ocena doboru tematu rozprawy

Współczesne konstrukcje coraz częściej budowane są z wykorzystaniem połączeń klejowych, które oferują wiele cech niemożliwych lub trudnych do uzyskania przy zastosowaniu innych rodzajów połączeń. Do istotnych zalet tego typu połączeń można zaliczyć brak konieczności wykonywania otworów pod łączniki, czy możliwość łączenia różnych materiałów, także o znacznych różnicach grubości. Jednak połączenia klejowe mają także wady, do których jak pisze Doktorantka należy temperaturowe ograniczenie zakresu stosowania takich połączeń czy długi czas utwardzania klejów, a także starzenie się materiałów spoin, powodujące degradację ich właściwości wytrzymałościowych. Spośród różnych rodzajów połączeń klejowych najczęściej stosowanymi są połączenia zakładkowe, które mimo prostej formy cechuje nierównomierny rozkład naprężeń w spoinie, co można traktować jako najistotniejszą wadę tego typu połączeń.

Całkowicie zgadzam się ze stwierdzeniem Doktorantki, że z uwagi na dążenie do szerszego stosowania połączeń klejowych coraz powszechniejsze jest stosowanie modyfikacji ich podstawowego kształtu, mające na celu poprawę właściwości mechanicznych, przez co możliwe jest powszechniejsze użycie tego typu połączeń zapewniających zachowanie wymaganej wytrzymałości i bezpieczeństwa konstrukcji klejonej. Z uwagi na ciągłe poszukiwania możliwości zwiększenia bezpieczeństwa i właściwości mechanicznych połączeń klejowych warto poddać analizie określone modyfikacje podstawowych kształtów połączeń zakładkowych. Uważam, że w świetle analizy dostępnej literatury Doktorantka podjęła się istotnego zadania polegającego na ilościowym i jakościowym oszacowaniu wpływu modyfikacji połączenia zakładkowego na jego wytrzymałość mechaniczną. **Reasumując, uważam, że podjęcie przez mgr. inż. Katarzynę Łabno problematyki oceny wpływu zmian geometrii elementów łączonych na właściwości statyczne i zmęczeniowe konstrukcyjnych połączeń klejowych blach ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 oraz stali S235JR należy uznać za uzasadnione, a sformułowanie tematu rozprawy za poprawne.**

### III. Analiza zakresu, celu i treści rozprawy

W przedstawionej do recenzji rozprawie Autorka podjęła się analizy wpływu modyfikacji kształtu elementów klejonych na wytrzymałość statyczną i zmęczeniową połączeń klejowych zakładkowych. We współczesnych konstrukcjach klejenie jest stosowane coraz częściej, gdzie zastępuje lub uzupełnia dotychczas stosowane rodzaje połączeń. Niektóre właściwości połączeń klejowych są rozpoznane bardzo dobrze, jednak ciągle istnieje wiele niezbadanych obszarów, co przy częstym wyborze tego rodzaju połączeń przez projektantów skłania do prowadzenia badań.

Z przeprowadzonego przez Doktorantkę przeglądu literatury wynika, że w spoinach połączeń klejowych zakładkowych występuje nierównomierny rozkład naprężeń ze spiętrzeniem w okolicach końców zakładki. Jest to niekorzystne zjawisko związane głównie z odkształceniem elementów obciążonego połączenia, w efekcie którego obszar końców zakładki jest miejscem inicjacji pęknięcia spoiny. Problem jest istotny, ponieważ połączenia zakładkowe są najpopularniejszym rodzajem połączeń klejowych. Jak zauważa Doktorantka, podejmowane były dotychczas różne próby konstrukcyjnego ograniczenia spiętrzenia naprężeń w tych obszarach poprzez zastosowanie m.in. ukosowania końców zakładki czy stosowania podcięć w elementach klejonych. Próby te przynoszą pozytywne rezultaty, co objawia się poprawą właściwości mechanicznych połączeń zakładkowych, lecz w niektórych przypadkach proponowane modyfikacje geometrii wydają się mieć ograniczoną użyteczność.

Ponadto, biorąc za podstawę źródła literaturowe, Autorka opisała podstawowe zjawiska związane z powstawaniem połączeń klejowych oraz wpływ czynników technologicznych i konstrukcyjnych na ich wytrzymałość mechaniczną. Do tych czynników należą m.in. długość zakładki i grubość warstwy kleju oraz występujące podczas eksploatacji konstrukcji rodzaje obciążeń, na co Autorka zwróciła szczególną uwagę i w wykonywanych na potrzeby pracy badaniach skupiała się na obciążeniach statycznych i zmęczeniowych. W mojej opinii Autorka nie wykorzystwała jednak w pełni uzyskanych w badaniach wyników, nie podejmując się analizy wpływu parametrów chropowatości i napięcia powierzchniowego na badane właściwości mechaniczne. Z kolei części eksperymentów związane z badaniami właściwości mechanicznych są obszerne i zawierają wartościowe wyniki i analizy, lecz sposób ich prezentacji przez Doktorantkę jest nieco trudny w odbiorze i interpretacji.

Podsumowując, należy ogólnie stwierdzić, że prawidłowo przeprowadzone przez Autorkę analizy literaturowe wykazały, iż modyfikacje strefy przykrawędziowej elementów połączeń zakładkowych mogą spowodować wzrost wytrzymałości statycznej i zmęczeniowej tych połączeń, jednak niezbędną jest szczegółowa wiedza na temat wprowadzonych modyfikacji i ich wpływie na rozkłady naprężenia w spoinach. **Wnioski (choć nie sformułowane jednoznacznie) wynikające z krytycznego przeglądu literatury przeprowadzonego przez Doktorantkę uważam za właściwe.**

Na podstawie analizy stanu zagadnienia Doktorantka sformułowała cel pracy, którym jest „analiza wpływu modyfikacji konstrukcyjnych elementów klejonych powodujących zmianę rozkładu naprężeń na właściwości wytrzymałościowe połączeń adhezyjnych”.

**Sformułowany przez Doktorantkę cel badawczy uważam za właściwy.**

Zawartość poszczególnych rozdziałów pracy jest powiązana z tytułem rozprawy i stanowi jego rozwinięcie oraz odpowiada sformułowanemu celowi badawczemu.

**Rozdział 1** (53 strony) zawiera teoretyczne wprowadzenie do tematyki rozprawy doktorskiej. Stanowi przedstawienie problematyki badawczej podjętej w rozprawie, poprzez prezentację zjawisk związanych z powstawaniem połączenia klejowego jak również powodów stosowania tego typu połączeń i obszarów wykorzystania konstrukcyjnych połączeń klejowych. Autorka podaje tu definicje adhezji i kohezji, wymienia rodzaje zniszczeń połączeń adhezyjnych. W rozdziale znajdują się również szerokie charakterystyki czynników mających wpływ na wytrzymałość połączeń klejowych. Doktorantka poprawnie zauważa, że na wytrzymałość połączeń klejowych zakładkowych wpływają: grubość spoiny, długość zakładki, grubość klejonych elementów, sztywność kleju i elementów łączonych oraz sposób przygotowania powierzchni do klejenia. W dalszym ciągu rozważań rozwijane są opisy i prowadzone analizy dotyczące wpływu czynników konstrukcyjnych na właściwości połączeń zakładkowych. Autorka podkreśla także istotne znaczenie wypłytki kleju dla wytrzymałości połączenia, które dzięki pozostawionej wypływce może wzrosnąć nawet o 20%. Wśród czynników istotnych dla wytrzymałości połączenia Doktorantka wymienia również ukosowanie końców zakładki, sygnalizując jedną z metod kształtowania geometrii połączenia klejowego. Ze względu na tematykę pracy, opisywane są szerzej również inne sposoby modyfikacji kształtu elementów łączonych prowadzące do zmiany rozkładu naprężeń w spoinie, a w konsekwencji zmieniające właściwości mechaniczne połączenia. Autorka zwraca uwagę na istotny problem wyznaczania naprężeń w spoinie połączenia klejowego, prezentując różne modele analityczne stosowane do tego celu od modeli uproszczonych po zaawansowane opracowane w ostatnich latach.

Również ze względu na problematykę pracy, Doktorantka prezentuje założenia i warunki normatywne prowadzenia badań wytrzymałości i trwałości zmęczeniowej połączeń klejowych. W rozważaniach Autorka stwierdza, że wytrzymałość zmęczeniowa takich połączeń jest znacznie niższa od ich wytrzymałości doraźnej i podobnie jak wytrzymałość statyczna, zależy od właściwości kleju, rodzaju klejonych materiałów, grubości spoiny i obecności wypływek kleju na krawędziach spoin. Doktorantka uzasadnia także potrzebę prowadzenia takich badań, jak również krótko omawia najczęściej używane formy prezentacji i interpretacji wyników badań zmęczeniowych.

W analizie literatury Autorka zawarła także opis metody elementów skończonych, ze szczególnym uwzględnieniem jej zastosowania do oceny stanu wyężenia spoiny klejowej.

W opisie znajdują się podstawowe informacje na temat możliwości MES w obliczeniach inżynierskich z niewielką ilością informacji na temat praktycznej realizacji badań.

W końcowej części rozdziału Autorka prezentuje podsumowanie analizy literaturowej, które oprócz tego, że jest według mnie jest zbędne (ponieważ sama analiza literatury jest już formą podsumowania stanu wiedzy w poruszonym temacie), to dodatkowo w większości nie stanowi, wbrew oczekiwaniom, podsumowania analizy literaturowej, podsumowanie badań własnych przeprowadzonych na potrzeby rozprawy.

**Rozdział 2** (4 strony) zawiera sformułowane w oparciu o analizę stanu zagadnienia cel, hipotezę i zakres pracy, których definicje mgr inż. Katarzyna Łabno także podaje w tym rozdziale. Autorka przedstawiła jeden cel badawczy i jedną hipotezę badawczą, które zostały zbadane w trakcie prowadzenia i analizy wyników badań. **Stwierdzam, że postawiony cel pracy, hipoteza i przyjęta koncepcja badań jest uzasadniona a zaproponowany zakres pracy właściwy.**

Autorka zaprezentowała także metodologię przyjętą do zrealizowania celu badawczego i sprawdzenia postawionej hipotezy. W skład zaproponowanej metodologii wchodzi:

- przygotowanie elementów próbek badawczych,
- analiza powierzchni klejonych elementów,
- przygotowanie połączeń klejowych,
- badanie eksperymentalne połączeń klejowych,
- analiza wyników badań oraz mikroskopowe badania przelomów połączeń klejowych,
- modelowanie numeryczne badanych połączeń,
- sformułowanie wniosków

Autorka scharakteryzowała krótko każdy z wymienionych etapów badań.

**Rozdział 3** (27 stron) zawiera opis badań przeprowadzonych z wykorzystaniem MES. Autorka przedstawia ogólny opis metody elementów skończonych, podaje etapy przygotowania do badań i ich prowadzenia oraz charakteryzuje kształty połączeń zakładkowych poddanych analizie – model bazowy oraz modele z wcięciami na krawędzi i otworami w strefie przykrawędziowej. W dalszej części rozdziału Doktorantka charakteryzuje oprogramowanie użyte w analizie, krótko omawiając jego możliwości w kontekście obliczeń numerycznych połączeń klejowych.

W opisie przygotowania do badań Autorka przedstawia kształty i wymiary modelowanych połączeń oraz zaznacza, że spoinę klejową o grubości 0,1 mm modelowano za pomocą jednej warstwy. W kolejnych etapach opisu mgr inż. Katarzyna Łabno prezentuje kroki budowy modeli badawczych oraz podaje przyjęte w obliczeniach parametry materiałowe elementów

połączenia jak również zawiera informacje na temat przyjętej siatki oraz warunków brzegowych, które jak zaznacza Autorka odpowiadają warunkom badań eksperymentalnych.

W pracy zawarte są rozkłady naprężeń w spoinach modelowanych połączeń, w mojej opinii zbędne w tak dużej liczbie, zwłaszcza, że Doktorantka, analizując graficzne prezentacje rozkładów odnosi się tylko do niektórych rozkładów. Maksymalne wartości wyznaczonych naprężeń są zaprezentowane na wykresach i w tabelach oraz uzupełnione analizami, które w przypadku samych wartości maksymalnych nie wyjaśniają „przyczyn wzrostu wytrzymałości jednozakładowych połączeń klejowych z zastosowanymi modyfikacjami w czołowej części połączenia” – co było oczekiwane przez Doktorantkę. Z kolei analiza rozkładów naprężeń w spoinach prowadzona przez Autorkę dotycząca wpływu spiętrzenia naprężeń w spoinie na wytrzymałość zmęczeniową pozwala jej wysnuć przypuszczenia, że odsunięcie obszarów spiętrzenia naprężeń od krawędzi połączenia może przyczyniać się do wzrostu wytrzymałości zmęczeniowej modyfikowanych połączeń. Doktorantka sugeruje, że brak istotnych różnic wartości maksymalnych wyliczonych naprężeń będzie przekładał się na brak wpływu badanych modyfikacji na wytrzymałość statyczną tych połączeń. W mojej opinii warto byłoby podjąć próbę odniesienia konkretnych wyznaczonych rodzajów naprężeń do odpowiadającego im wpływu na właściwości mechaniczne.

**Rozdział 4** (11 stron) zawiera opis przygotowania do badań eksperymentalnych. Doktorantka do badań wybrała połączenia klejowe zakładkowe elementów o grubości 2 mm wykonanych ze stali S235JR oraz stopu aluminium EN AW 2024-T3. Autorka zaprezentowała charakterystyki obydwu klejonych materiałów podając szereg ich właściwości oraz obszary zastosowań. Jako tworzywo adhezyjne do wytworzenia próbek został użyty dwuskładnikowy klej epoksydowy Araldite 2014-2, którego krótką charakterystykę również zaprezentowano w tekście. Autorka w opisie kleju podaje, że producent w karcie produktu podaje informacje na temat sposobu przygotowania powierzchni klejonych elementów oraz sposobu nanoszenia kleju. Szkoda, że te informacje nie są rozwinięte, ponieważ w dalszej części rozprawy mgr inż. Katarzyna Łabno sugeruje, że w niektórych badanych połączeniach znaczny rozrzut wyników mógł być efektem niepoprawnie naniesionego kleju. W dalszej części opisany jest sposób przygotowania powierzchni elementów klejonych oraz proces klejenia próbek w specjalizowanym uchwycie. Nieco dziwi, że opis klejenia próbek umieszczono przed opisem przygotowania powierzchni klejonych z wykorzystaniem obróbki strumieniowo-ścierniej i wyznaczania parametrów chropowatości klejonych powierzchni oraz ich swobodnej energii powierzchniowej. Doktorantka podaje, że obróbka strumieniowo-ścierna ma za zadanie m.in. aktywację powierzchni powodującą zwiększenie swobodnej energii powierzchniowej i następnie mierzy swobodną energią powierzchniową oraz chropowatość elementów po

obróbce Po wykonaniu połączeń klejowych, Doktorantka usunęła wyływki kleju i przystąpiła do przeprowadzenia badań eksperymentalnych

**Rozdział 5** (57 stron) przedstawia badania wytrzymałości statycznej połączeń klejowych oraz dyskusję i analizy statystyczne ich wyników.

Badania rozpoczęto od badań wytrzymałości statycznej połączeń klejowych elementów ze stali S235JR. Do badań Autorka przygotowała 5 różnych, zgodnych z założeniami połączeń - jedno bazowe (bez modyfikacji) oraz cztery ze zmodyfikowaną fizycznie częścią przykrawędziową zakładki. Doktorantka przedstawiła również rysunki techniczne próbek oraz ich oznaczenia używane w dalszej części pracy, a także podała warunki prowadzenia badań.

Opisując charakter zniszczeń badanych połączeń Autorka stwierdziła, że „wszystkie próbki uległy zniszczeniu w wyniku utraty przyczepności spoiny klejowej do łączonych elementów” a dalej pisze, że „każde ze złączy uległo uszkodzeniu w wyniku kohezijnego mechanizmu zniszczenia” co jest dość niejednoznaczne.

Doktorantka zaprezentowała wyniki badań wytrzymałości doraźnej próbek zakładkowych w postaci tabel z wynikami i przykładowych (nazwanych reprezentatywnymi) wykresów z przeprowadzonych prób. W mojej opinii analizy są nieczytelne, co znacznie utrudnia interpretację uzyskanych w badaniach wyników. Wyniki badań wskazują według Doktorantki, że wprowadzenie modyfikacji w postaci wcięć na krawędzi zakładki połączeń elementów stalowych i ze stopu aluminium podnosi sztywność połączenia. W podsumowaniu analiz wyników badań wytrzymałości statycznej mgr inż. Katarzyna Łabno zauważa, że zastosowane modyfikacje konstrukcyjne w postaci wcięć i otworów na krawędzi zakładki nie wpływają znacząco na właściwości wytrzymałościowe połączenia. Uzyskane wyniki charakteryzują się według Doktorantki znacznym rozrzutem, co jak stwierdza może być efektem błędów podczas przygotowania powierzchni klejonych elementów, nakładania kleju czy konstytuowania połączenia. W mojej opinii w większości przypadków taki rozrzut wyników jest charakterystyczny dla tego typu badań.

Po badaniach właściwości mechanicznych Doktorantka przeprowadziła badania przelomów połączeń na podstawie prawdopodobnie fotografii (tak myślę, bo Autorka nie wyjaśnia tego). W efekcie przeprowadzonej analizy makrofotograficznej Autorka stwierdziła, iż w obszarze wcięć widoczne są mikropęknięcia tworzywa adhezyjnego, będące efektem pochłaniania części energii niszczenia spoiny. W dalszej części Doktorantka zauważa, że mikropęknięcia różnią się w zależności od wprowadzonej modyfikacji kształtu, ale nie przekłada się to na różnice w wytrzymałości statycznej badanych połączeń. Podsumowując, Doktorantka stwierdza, że rozważane modyfikacje konstrukcyjne mogą wpływać na mechanizm pęknięcia spoin w wyniku pochłaniania części energii niszczenia, czego nie obserwuje się w spoinach połączeń niemodyfikowanych.

Autorka przeprowadziła analizy statystyczne uzyskanych wyników wykorzystując w tym celu: test t-Studenta, test ANOVA oraz analizę regresji i korelacji.

**Rozdział 6** (33 strony) przedstawia wyniki badań zmęczeniowych badanych połączeń. Doktorantka prowadziła badania z wykorzystaniem maszyny HT-9711, obciążając próbki cyklem o przebiegu sinusoidalnym i częstotliwości 30 Hz. Do określenia wytrzymałości zmęczeniowej założono, umowną, graniczną liczbę cykli o wartości 2 000 000.

W przypadku próbek stalowych Autorka zauważyła wzrost wytrzymałości zmęczeniowej połączeń dla każdej z modyfikacji o ponad 6%. Analizując trwałość zmęczeniową dla większych wartości amplitudy naprężenia Doktorantka zaobserwowała, że w tym przypadku wzrost trwałości będący efektem wykonanych w strefie przykrawędziowej wcięć czy otworów jest bardzo znaczący. Takie zjawisko Autorka wiąże z założeniem pochłaniania części energii odkształcenia połączenia przez klej wypełniający wcięcia i otwory, co może mieć znaczenie przy większych wartościach amplitudy obciążenia, którym towarzyszą większe odkształcenia w obszarze połączenia. Analizując powstałe na podstawie wyników badań krzywe zmęczenia, Autorka potwierdza wcześniejsze obserwacje, że efekt wprowadzenia modyfikacji geometrii połączenia zakładkowego elementów stalowych jest znacznie wyraźniejszy dla większych amplitud cykli obciążenia. Uwagę Doktorantki zwraca również większy rozrzut wyników badań połączeń modyfikowanych niż w przypadku połączeń bazowych. Analizie poddano także obrazy mikroskopowe (choć Autorka nazywa te analizy makroskopowymi) wykonane przy użyciu mikroskopu skaningowego PhenomProX. Doktorantka zauważa, że w połączeniach niemodyfikowanych, w których zadane obciążenie (szkoda, że Autorka nie podaje jaka to względna wartość, odniesiona do wytrzymałości statycznej, bo utrudnia to interpretację wyników) powodowało zniszczenie po około 10 000 cykli na krawędziach przełomów wystąpiło zniszczenie adhezyjne a w środkowej części zniszczenie kohezyjne. W połączeniach z wcięciami obciążonych cyklem powodującym zniszczenie również po około 10 000 cykli Autorka zaobserwowała zniszczenie kohezyjne z niewielkim udziałem zniszczeń adhezyjnych. Z kolei w przełomach zniszczeń, które nastąpiły po kilkuset tysiącach cykli obciążenia (600 000 – 700 000) zaobserwowano prążki pęknięć zmęczeniowych o różnym charakterze w przypadku próbek modyfikowanych i niemodyfikowanych.

W dalszej części Doktorantka opisuje badania zmęczeniowe połączeń elementów ze stopu aluminium. W przypadku połączeń tego materiału wytrzymałość zmęczeniowa rośnie wraz ze wzrostem szerokości wcięć w krawędzi zakładki – dla najwęższych wcięć jest taka sama jak dla połączeń niemodyfikowanych a dla wcięć szerokich wzrasta o 20%. W przypadku obciążeń zmęczeniowych o większej amplitudzie, trwałość zmęczeniowa wyraźnie zależy od szerokości wcięcia – im szersze wcięcia, tym wyższa wartość trwałości zmęczeniowej. W próbkach modyfikowanych poprzez otwory wykonane w części przykrawędziowej

elementów klejonych Doktorantka również zauważa wzrost trwałości zmęczeniowej w przypadku badań niskocyklowych, przy czym różnica trwałości zmęczeniowej jest tym wyższa, im wyższe są amplitudy obciążeń.

Autorka, podobnie jak w przypadku połączeń elementów stalowych analizie poddała także obrazy mikroskopowe przełomów połączeń ze stopu aluminium wykonane przy użyciu mikroskopu skaningowego. Doktorantka zauważa, że charakter pęknięć w połączeniach modyfikowanych i niemodyfikowanych jest inny.

**Biorąc pod uwagę spektrum przeprowadzonych i zaprezentowanych przez Autorkę badań, rozdział 6 uważam za najbardziej wartościowy w całej rozprawie.**

**Podsumowanie i wnioski (rozdział 7)** (4 strony) zawiera podsumowanie każdego z etapów badań i wnioski wynikające z realizacji rozprawy. Doktorantka właściwie wnioskuje, iż w oparciu o analizę wyników przeprowadzonych badań eksperymentalnych można stwierdzić istnienie zależności pomiędzy wprowadzonymi modyfikacjami a trwałością zmęczeniową. Ponadto Autorka również stwierdza, że badane modyfikacje nie wpływają znacząco na wytrzymałość statyczną badanych połączeń. Oprócz ogólnych wniosków Doktorantka podjęła próbę wyjaśnienia wzrostu trwałości zmęczeniowej połączeń modyfikowanych oraz korzyści płynących z modyfikacji kształtu połączeń klejowych.

Ostatnimi elementami pracy są: bibliografia (125, a właściwie 114 pozycji), spis rysunków, spis tabel oraz streszczenie w języku polskim i angielskim.

#### **IV. Ocena rozprawy**

Uważam, że zasadniczym i najważniejszym dorobkiem mgr. inż. Katarzyny Łabno jest określenie wpływu modyfikacji geometrii połączenia zakładkowego w strefie przykrawędziowej na właściwości mechaniczne tego typu połączenia. Uzyskane przez Doktorantkę wyniki wskazują, że projektując połączenia klejowe zakładkowe elementów metalowych warto brać pod uwagę modyfikację ich kształtu w pobliżu krawędzi zakładki. Dorobek ten stanowi wkład w rozwój dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna.

Dokonując oceny układu rozprawy należy zaznaczyć, że jej ogólna formuła i zakres wynikają z realizacji celu rozprawy. Przyjęta koncepcja badań jest wystarczająco uzasadniona, a zastosowane narzędzia i przyjęte metody badawcze są do niej adekwatne. Interpretacja wyników jest jednak dość utrudniona z powodu stylistycznych błędów językowych i braku spójnej koncepcji prezentacji wyników badań oraz ogólnego uporządkowania płynących z dyskusji wyników spostrzeżeń i wniosków. Ponadto, brakuje mi w rozważaniach próby podjęcia głębszej dyskusji na temat związku statystycznego opracowania wyników badań wytrzymałości statycznej z założeniami modyfikacji połączeń.

Uważam (pomimo uwag), że zarówno struktura rozprawy mgr. inż. Katarzyny Łabno jak i sposób opracowania materiału, a także forma przeprowadzonej analizy i przyjęta metodyka badań pozwalają stwierdzić, że cel rozprawy został osiągnięty.

W mojej opinii zarówno materiał literaturowy jak i badawczy zostały przez Doktorantkę wykorzystane właściwie, chociaż w wielu miejscach brakuje właściwego uporządkowania treści i daje się zauważyć pewien chaos. Autorka wykazała się ogólną wiedzą teoretyczną w obszarze połączeń klejowych (choć nie zgadzam się ze stosowanym w niektórych przypadkach nazewnictwem), znajomością przedmiotu badań, umiejętnością właściwego ujęcia rozpatrywanego problemu i jego rozwiązania. Wybrana forma rozprawy oraz sposób opracowania materiału empirycznego a także sposób przeprowadzonej analizy i przyjęta metodyka badań są poprawne dla tego rodzaju prac.

## **V. Uwagi szczegółowe**

Zawartość merytoryczną rozprawy oceniam pozytywnie, jednak mimo takiej oceny, podczas czytania tekstu pracy nasunęły mi się pewne pytania i uwagi krytyczne.

1. Znaczna liczba błędów edycyjnych (nawet w tytule rozprawy), stylistycznych i składniowych utrudnia odbiór zawartych w rozprawie treści i interpretację jej wyników. Przykładowo tytuł podrozdziału „Modyfikacje konstrukcyjne elementów klejonych wpływające na poprawę ich wytrzymałości” – kiedy w zamyśle Autorki (wg mnie) była poprawa wytrzymałości połączeń elementów a nie samych elementów.
2. Stosowanie w wielu miejscach nietechnicznych sformułowań i zwrotów typu „śmiało potwierdzić” czy „niewątpliwym wzrost” uważam za niewłaściwe w tego rodzaju opracowaniach.
3. We wstępie brak jest nawiązania do tematu rozprawy, co uważam za niedopatrzenie.
4. W pracy używane są wg mnie niefortunnie lub błędnie słownictwo takie jak: skleina zamiast spoina, konstrukcja klejowa zamiast konstrukcja klejona, statyczne zamiast statystyczne, nośność zamiast wytrzymałość, faktograficznej zamiast fotograficznej, ściąganie zamiast ścinanie, ilość zamiast liczba, itp.
5. W pracy znajduje się wykaz ważniejszych oznaczeń, w którym brakuje ważnych oznaczeń, jak np. grubość spoiny (dla której ponadto jest stosowane wiele różnych oznaczeń).
6. Proszę o wyjaśnienie, co Doktorantka rozumie pod pojęciem „znaczna grubość kleju” (str. 12).
7. Proszę o wyjaśnienie, co Autorka miała na myśli pisząc, że „stwierdzono, że kleje o słabszym wiązaniu i plastyczne są bardziej odpowiednie dla geometrii złącza, które wykazują duże zmiany naprężeń” (str. 12).

8. Niektóre rysunki w ogóle nie są wspomniane w tekście pracy.
9. Niejasny w mojej opinii jest pomysł nadawania tym samym pozycjom literaturowym różnych numerów, w związku z czym niektóre z nich występują w tekście dwu lub trzykrotnie z innym numerem.
10. Rysunki prezentowane w pracy powinny być umieszczane w pobliżu tekstu, z którym są związane. Jakość niektórych rysunków jest niska, co wynika z bezpośredniego kopiowania ich ze źródeł literaturowych bez podjęcia próby poprawy ich jakości. Ponadto należy zwracać uwagę na właściwą numerację rysunków, której w pracy w kilku miejscach nie utrzymano, co utrudnia interpretację tekstu.
11. W pracy występują powtórzenia tych samych treści.
12. W niektórych miejscach analizy literaturowej Autorka po prostu wymienia kolejno informacje z różnych źródeł, nie starając się podejmować próby kompilacji, porównania i usystematyzowania tych informacji.
13. Autorka w kilku miejscach pracy przedstawia zaskakujące informacje, takie jak przykładowo „nie prowadzono szczególnych badań dotyczących ingerencji w geometrie brzegów klejonych elementów w zakładkowych połączeniach klejowych” czy „rozzrut wyników może wpływać na nierównomierne wypełnienie wcięć klejem”.
14. W podsumowaniu analizy literaturowej Autorka odnosi się w dużej części do badań własnych, na które powinno być miejsce w dalszej części pracy.
15. Pierwszym etapem badań wg opisu zamieszczonego w rozdziale 2 powinno być przygotowanie próbek i przeprowadzenie badań eksperymentalnych, podczas gdy Doktorantka rozpoczyna od analizy MES, co jest niezgodne z opracowanym planem, którego należy przestrzegać lub zmienić, jeśli była taka potrzeba.
16. Na jakiej podstawie przyjęto wartości obciążeń w badaniach numerycznych?
17. W jakim celu Doktorantka prezentuje tak dużą liczbę rozkładów naprężeń w spoinach, które z powodu rozmiarów są nieczytelne?
18. Czy klej nanoszono tylko na jedną powierzchnię klejoną? – jeśli tak, to dlaczego?
19. Doktorantka pisze, że wybierając metodę obróbki powierzchni elementów klejonych sugerowała się doświadczeniami - proszę o wyjaśnienie (jakimi doświadczeniami?).
20. Jednostki miary podawane przy wielkościach, powinny być umieszczane w nawiasach kwadratowych.
21. Odchylenia standardowe wartości średniej powinny być podawane razem ze średnią, której dotyczą. Podawanie ich oddzielnie nie jest właściwe.
22. W mojej opinii obrazy uzyskane w trakcie badań z wykorzystaniem profilometru i goniometru zostały przeanalizowane zbyt ogólnie.
23. Według mnie rysunki 5.1. czy 5.2. (i inne) przedstawiające widok maszyny badawczej są zbędne, ponieważ nie wnoszą niczego do rozprawy.

24. W pracy trudno doszukać się zwięzłego fragmentu traktującego o koncepcji formy wprowadzonych modyfikacji (np. uzasadnienia wymiarów, czy rozmieszczenia).
25. Na stronie 111 znajduje się informacja że dla każdego wariantu modyfikacji wykonano po cztery powtórzenia badań, co wydaje się niepoprawne, ponieważ w tabelach z wynikami widnieje po pięć wartości.
26. W opisie wyników badań statycznych występuje znaczne nieuporządkowanie treści. Warto byłoby chociaż podać w kolejności, że dotyczą próbek SWD, SWS, SWM i SWO i uporządkować te analizy, krótko podsumowując każdą z modyfikacji dla uzyskania przejrzystości.
27. Proszę o wyjaśnienie jakim zniszczeniom ulegały w badaniach statycznych próbki stalowe, ponieważ zapis w tekście pracy (str. 111) jest niejednoznaczny.
28. Serie pomiarów wykonuje się w celu uzyskania wartości średniej, która lepiej obrazuje wiarygodny wynik badań niż wynik pojedynczego pomiaru, zatem w jakim celu Doktorantka tak wiele analiz poświęca wynikom pojedynczych pomiarów?
29. Brak podawania odchyłeń standardowych utrudnia porównania wyników badań statycznych, a stwierdzenie, że różnica (przyrostu) wynosi 1% trudno jest uznać za wartościowe.
30. Proszę o wyjaśnienie w jaki sposób i w jakim stopniu „błąd zaokrągleń kalkulacji”, jak pisze Doktorantka wpływa na podawane wartości nośności (str. 134)?
31. Stosowanie określenia „perforacja” jako synonim wcięcia jest w mojej opinii niedopuszczalne.
32. W jaki sposób wykonywano badania przełomów połączeń po badaniach statycznych? Jakie wyposażenie zostało użyte w tych badaniach?
33. Co oznacza sformułowanie „przełom jednowarstwowy (str. 141)?
34. Wyniki badań wytrzymałości statycznej zostały poddane analizie statystycznej, jednak w próbie analizy jej wyników np. metodą t-Studenta Doktorantka prezentuje kilka tabel, pisze m.in., że „spośród 78 porównań .... 37 wykazuje istotne różnice”, natomiast brak jest analizy takiego zapisu i podania, co taki zapis właściwie oznacza.
35. Proszę o wyjaśnienie, czy wyniki testu ANOVA znajdują potwierdzenie w badaniach eksperymentalnych? Proszę także o wyjaśnienie, w których wariantach modyfikacji według testu ANOVA występuje ich największy wpływ na nośność połączenia i dlaczego (co w wynikach testu na to wskazuje)?
36. Co oznacza pojęcie „analiza statyczna” wielokrotnie używane w rozdziale dotyczącym badań zmęczeniowych?
37. Proszę uzasadnić, że próbki do badań statycznych i zmęczeniowych zostały przygotowane prawidłowo wobec znajdujących się w pracy zapisów o nierównomiernym rozprowadzeniu kleju czy dokładności wykonania modyfikacji.

38. W pracy brakuje informacji na temat wyboru parametrów badań zmęczeniowych. Proszę o ich podanie i uzasadnienie wyboru.
39. Analiza przełomów zmęczeniowych nie potwierdza występowania prążków zmęczeniowych w tych połączeniach, dlaczego zatem Doktorantka przyjmuje taki schemat powstawania przełomów?
40. W mojej opinii błędnie podano, iż podrozdział 6.2 dotyczy analizy makroskopowej powierzchni przełomów zmęczeniowych.
41. Według mnie nie powinno się stosować uogólnień, ponieważ prowadzą one do błędnych interpretacji wyników. Przykładowo, jeżeli wśród badanych trzech modyfikacji połączenia dla dwóch występuje wyraźna poprawa wytrzymałości, a dla jednej modyfikacji nie ma zmian względem wariantu bazowego, niewłaściwym jest formułowanie stwierdzenia, że wytrzymałość dla wszystkich modyfikowanych wariantów jest wyższa.
42. Doktorantka w kilku miejscach pisze, że „połączenie osiągnęło maksymalną wartość obciążenia ...”, co nie jest poprawne, ponieważ gdyby zastosować wyższą wartość obciążenia, to połączenie również ulegnie zniszczeniu po pewnej liczbie cykli.
43. Proszę o wyjaśnienie, co Doktorantka rozumie pod pojęciem „krawędź natarcia kleju” (str. 191) czy „krawędź natarcia złącza” (str. 193).

## VI. Wniosek końcowy oceny rozprawy

Przedstawioną do recenzji pracę doktorską oceniam pozytywnie i stwierdzam, że została przygotowana na wystarczającym poziomie merytorycznym. Zawarte w pracy treści dotyczą problemów związanych z wpływem modyfikacji geometrii połączenia zakładkowego na jego wytrzymałość statyczną i zmęczeniową. Treści merytoryczne i poziom przeprowadzonych badań świadczą o wystarczającej dojrzałości naukowej, wiedzy i umiejętnościach Doktorantki.

Zaprezentowane w rozprawie wyniki badań stanowią oryginalny dorobek naukowy Doktorantki, a rezultaty pracy mogą z powodzeniem zostać wykorzystane w praktyce.

Uwagi krytyczne nie umniejszają wartości merytorycznej pracy. Na taką ocenę ma wpływ fakt realizacji zakładanego celu badawczego.

Reasumując, stwierdzam, że rozprawa przedstawiona do recenzji **stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz potwierdza ogólną wiedzę teoretyczną i praktyczną Kandydatki w Dyscyplinie Naukowej Inżynieria Mechaniczna wraz z umiejętnościami samodzielnego prowadzenia pracy naukowej**. Spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2022 r., poz. 574 z późn. zmianami)”.

Stawiam zatem wniosek o przyjęcie opracowania przedstawionego do recenzji jako rozprawy doktorskiej mgr inż. Katarzyny Łabno na stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna i dopuszczenia jej do publicznej obrony.

A handwritten signature in blue ink, consisting of a stylized initial 'A' followed by the name 'Kowalski'.