

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Katarzyny Łabno nt.
„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”

Niniejszą recenzję opracowano na zlecenie Z-cy Przewodniczącego Rady Dyscypliny
Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej
prof. dr hab. inż. Andrzeja Kawalca
pismo nr RM-530-05-03/2025
z dnia 26 listopada 2025 r.

1. Ogólna, formalna charakterystyka pracy

Recenzowana rozprawa została przedstawiona na 223 stronach maszynopisu i zawiera poza spisem treści, wykazem ważniejszych oznaczeń i skrótów, streszczeniem języku polskim i angielskim, spisem rysunków i tabel oraz wstępem:

- rozdział pierwszy, w którym Doktorantka scharakteryzowała mechanizmy odpowiedzialne za powstawanie połączeń adhezyjnych, przedstawiła rozkłady naprężeń w spoinie połączenia klejowego oraz zdefiniowała czynniki materiałowe, konstrukcyjne i technologiczne mające wpływ na parametry wytrzymałościowe i użytkowe połączeń klejowych;

- rozdział drugi, w którym zaprezentowano cel pracy i jej zakres oraz postawiono hipotezę badawczą;

- rozdział trzeci, w którym zaprezentowano wyniki symulacji numerycznych wykonanych na bazie metody elementów skończonych dla modyfikowanych połączeń klejowych;

- rozdział czwarty z opisem technologii przygotowania próbek połączeń klejowych do badań, łącznie z charakterystyką badania chropowatości powierzchni oraz swobodnej energii powierzchniowej;

- rozdział piąty, w którym zaprezentowano wyniki badań niszczących połączeń w zakresie obciążenia statycznego;

- rozdział szósty z wynikami trwałości i wytrzymałości zmęczeniowej połączeń oraz dodatkowo z wynikami analizy makroskopowej złomów połączeń po badaniach trwałościowych;
- podsumowanie i wnioski,
- wykaz cytowanej literatury, zawierający 125 pozycji.

2. Ocena tematu i zakresu pracy

W przedłożonej pracy Doktorantka podjęła się rozwiązywania zagadnienia związanego z oceną zabiegów technologicznych wykonywanych na końcach zakładek jednostronnych połączeń klejowych w celu poprawy przede wszystkim trwałości zmęczeniowej połączeń oraz w ograniczonym zakresie również ich wytrzymałości doraźnej. Zabiegi technologiczne polegały na wycięciu na krawędziach łączonych elementów wcięć o różnej geometrii oraz otworów o różnej średnicy. Jako łączony materiał wykorzystywano elementy przygotowane ze stali S235JR oraz stopu aluminium EN AW-2024-T3, natomiast jako klej zastosowano tworzywo Araldite 2014-2.

Ponieważ właściwości wytrzymałościowe i użytkowe połączeń klejowych istotnie zależą m.in. od rozkładu naprężeń w spoinie połączenia, szczególnie w strefie spiętrzenia naprężeń (końce zakładek połączenia), Doktorantka zaproponowała skuteczną próbę poszukiwania korelacji pomiędzy lokalnym obniżeniem sztywności połączeń na końcach zakładki (i przy okazji naprężeń) a parametrami wytrzymałościowymi i użytkowymi połączeń. Dowodowe testy eksperymentalne wykonywała zarówno w zakresie statycznym jak i w zakresie zmiennych obciążeń.

Do przygotowania powierzchni łączonych elementów zaproponowała obróbkę strumieniowo-ścierną, co jest akceptowalnym rozwiązaniem, przy okazji oceniając jej skuteczność w badaniach pomiaru chropowatości powierzchni oraz w badaniach jej energii swobodnej.

W literaturze znane są różne metody obniżania nierównomiernego rozkładu naprężeń na końcach zakładki spoiny klejowej, również poprzez lokalne obniżenie sztywności klejonych elementów w strefie końca zakładki połączenia. Zaproponowany przez Doktorantkę sposób wydaje się interesujący technologicznie i jak wskazują wyniki badań - skuteczny. Badania eksperymentalne zostały wsparte symulacjami numerycznymi, choć otrzymane wyniki symulacji byłyby bardziej przekonujące, gdyby zostały zaprezentowane zmiany naprężeń w samych spoinach połączeń a nie w całym połączeniu.

Wyniki analiz Doktorantki są aktualne w kontekście obecnego poziomu wykorzystywania konstrukcyjnych połączeń klejowych w rozwiązaniach technicznych, chociażby poprzez coraz szersze wykorzystywanie w budowie maszyn polimerowych materiałów kompozytowych dla których połączenia adhezyjne są jednymi z bardziej efektywnych połączeń. Materiałem konstrukcyjnym, który również z powodzeniem jest łączony techniką klejenia np. w statkach powietrznych jest wykorzystywany przez Doktorantkę stop aluminium serii EN AW-2024-T3.

Dlatego też badania, których celem jest poprawa trwałości zmęczeniowej konstrukcyjnych połączeń klejowych jest działaniem celowym i pożytecznym.

3. Ocena rozprawy

Do podstawowych zalet rozprawy pod względem wyboru metod i zakresu badań, opracowania i prezentacji wyników oraz badawczego wkładu Doktorantki zaliczam:

- a) podjętą tematykę,
- b) opracowanie planu realizacji badań eksperymentalnych z wykorzystaniem nowoczesnych narzędzi badawczych i analitycznych,
- c) wieloetapowe badania eksperymentalne, szczególnie w zakresie trwałości zmęczeniowej połączeń klejowych,
- d) zdefiniowanie najkorzystniejszych wariantów modyfikowanych połączeń, zarówno dla elementów stalowych jak i aluminiowych,

Doktorantka powołuje się na 125 publikacji naukowych, co jest wystarczającą liczbą w przypadku pracy doktorskiej. Analiza literatury została wykonana dobrze, a jej wyniki są przedstawione na ponad 50 stronach opracowania. Konkluzje z analizy literatury uzasadniają podjęcie tematu rozprawy, z tym że część sformułowań zdefiniowanych w tej części pracy jest prezentowana w sposób bardzo uproszczony lub może być niezrozumiała dla czytelnika. Autorka też wielokrotnie w tej części pracy, niepotrzebnie moim zdaniem, powtarza powszechnie znane stwierdzenie o maksymalnych wartościach napreżeń na końcach zakładki w połączeniu jednozakładkowym obciążonym na ścinanie. Szczegóły niedociągnięć językowych zostały zaprezentowane w dalszej części recenzji. Praca zawiera hipotezę badawczą, cel naukowy i zakres badań, w tym program wykonywania testów eksperymentalnych.

Recenzowana praca wnosi oryginalny wkład w rozwój inżynierii mechanicznej, za który uważam pozytywne zweryfikowanie proponowanego rozwiązania technologicznego w zakresie istotnej poprawy trwałości zmęczeniowej jednozakładkowych połączeń klejowych. Przedstawiona praca, w tym liczba wykonywanych testów i wykorzystanie nowoczesnych

narzędzi badawczych i analitycznych, świadczy o dobrym przygotowaniu Doktorantki do planowania i prowadzenia badań eksperymentalnych, co stanowi dobrą podstawę do samodzielnego prowadzenia dalszych badań naukowych. Lektura całości rozprawy, poza niektórymi sformułowaniami zawartymi w pracy, sprawia raczej pozytywne wrażenie.

Rozprawa jest zaprezentowana w sposób logiczny, nie mam również poważniejszych uwag co do prowadzonego eksperymentu oraz poprawności wnioskowania. W ramach publicznej dyskusji chciałbym dowiedzieć się: i) czy w testach zmęczeniowych przy przyjętej częstotliwości zmian obciążenia 30 Hz obserwowano proces nagrzewania się spoin połączeń i jaki może być wpływ temperatury na trwałość zmęczeniową połączeń klejowych?, ii) czy w kontekście otrzymywanej w badaniach statycznych nośności połączeń klejowych (ich wytrzymałości doraźnej na ścinanie) w tabelach z wynikami badań zmęczeniowych (Tab. 6.1÷Tab.6.10) definiowana jest wartość amplitudy naprężenia czy maksymalna wartość naprężenia w cyklu?, iii) kierując się jakimi przesłankami w testach zmęczeniowych przyjęto współczynnik asymetrii cyklu równy $R=0,1$?

Przy lekturze pracy zauważyłem kilka niedociągnięć i niezręczności językowych, które nie mają istotnego wpływu na ogólnie pozytywny odbiór pracy, w tym m.in.:

- str. 10. – „Klej musi być zdolny do przenoszenia różnych rodzajów naprężeń, takich jak ...” czy „W miejscu połączenia, naprężenia ściskające mogą powodować odkształcenia lub uszkodzenia.” – zarówno naprężenia jak i odkształcenia w materiałach konstrukcyjnych są konsekwencją działania obciążeń – więc: i) naprężenia są związane z odkształceniami, ale ich nie wywołują i ii) klej nie musi być zdolny do przenoszenia naprężeń, bo one powstają w kleju w wyniku działania obciążeń,
- str. 10. – „Typ połączenia..., rodzaj obciążenia (*ściągające*, ...)
 – mało zrozumiały zapis;- str. 14 podpis pod Rys. 1.4 „...obciążonych na *ściągnięcie*...” - mało zrozumiały zapis;
- str. 14. – „Model uproszczony zakłada *nie odkształcalność*....” – powinno być nieodkształcalność;
- str. 18. – zależność 1.15 „...*coth*...” – powinno być „*cosh*”;
- str. 23. „Zakładkowe połączenie klejowe obciążone na ścinanie *zależy od*...” – zapis nieprecyzyjny, połączenie zakładkowe nie zależy od wymienionych w zdaniu parametrów;

- str. 27. – „W pracach [28-42] zaprezentowano wyniki badań dotyczące analizy *grubości spoiny*. Wraz ze wzrostem *grubości klejonych elementów wzrasta...*” – korzystniej dla czytelnika byłoby rozwinąć tematykę związaną z wpływem grubości spoiny na nośność połączeń i następnie przejść do tematu wpływu grubości łączonych elementów na parametry wytrzymałościowe połączeń – w pracy na stronach 27/28 wyjaśnianie tych dwóch zagadnień jest wymieszane, przez co tekst staje się mniej przyswajalny dla czytelnika;
- str. 27, 28, 36, 133, 135 – „...daje najlepszą wytrzymałość na *ścianie*” – powinno być na ścinanie, ta pomyłka językowa przewija się przez całą pracę,
- str. 41 – „W analizach wytrzymałości doraźnej połączeń klejowych zakładkowych *lepkosprężystość klejów jest pomijana, zakłada się wówczas ich liniową sprężystość, dla uproszczenia*” – niewłaściwy układ wyrazów w zdaniu;
- str. 47. – „Zmiana kształtu klasycznego połączenia zakładkowego obciążonego na ścinanie, która polega na równomiernym zmniejszeniu szerokości jednej blachy na odcinku zakładki zapewnia bardziej równomierny rozkład naprężeń stycznych w spoinie (rys. 1.36) Rys.1.37. *Wpływ podcięcia na wytrzymałość połączenia zakładkowego. Mimo*” – niepotrzebne wtrącenie;
- str. 48. – „Wykazano, że im mniejszy jest kąt zaokrąglenia i wewnętrzny kąt frezowania na końcach zakładki, tym *mniejszy jest rozkład naprężeń*” – co oznacza mniejszy rozkład naprężeń? rozkład naprężeń może być np. mniej lub bardziej równomierny - niewłaściwe określenie;
- str. 48/49. – „W połączeniach klejowych zakładkowych na skutek *nie osiowego przyłożenia sił* występują obok naprężeń stycznych dodatkowe *naprężenia rozciągające, skierowane*” – *nieosiowego* piszemy łącznie, zasadniczo w wytrzymałości materiałów definiowane są naprężenia normalne i styczne, natomiast rozciąganie jest stanem obciążenia materiału, korzystniejszy był zapis: naprężenia normalne dodatnie;
- str. 57. – „Konstrukcje klejone poddawane są obciążeniom dynamicznym (cyklicznym), należy rozważyć odporność zmęczeniową złącza” – niewłaściwie sformułowane zdanie;
- str. 60. – „Badania numeryczne prowadzone *przy pomocy* metody elementów....”, „W procesie rozwiązywania problemu *przy pomocy* obliczeń...” zasadniczo używa

się sformułowań przy pomocy *kogoś*, za pomocą *czegoś*, w tym kontekście lepiej użyć wyrażenia za pomocą:

- str. 57. – „Konstrukcje klejone poddawane są obciążeniom dynamicznym (cyklicznym), należy rozważyć odporność zmęczeniową złącza” – niewłaściwie sformułowane zdanie;
- str. 69. – „Spoinę klejową zamodelowano jako warstwę, osobny element.” - mało czytelny zapis;
- str. 72., Tab. 3.2, Tab. 3.3: „Wytrzymałość na rozciąganie stali S235JR – 49 MPa?, Wytrzymałość na rozciąganie stopu aluminium EN AW-2024-T3 – 39 MPa?” – nie ten rząd wielkości wytrzymałości dla tego rodzaju materiałów konstrukcyjnych;
- str 77. ÷ 84., Tab.3.4 ÷ 3.11 - umieszczone w tabelach rysunki z mapami naprężeń i legendą są mało przydatne, wartości liczbowe umieszczone przy legendzie są nieczytelne;
- str. 85 ÷ 89., Rys. 3.10 ÷ Rys. 3.17. – podpisy pod rysunkami wskazują, że wartości naprężeń są definiowane dla **spoiny** połączenia, co jest nielogiczne biorąc pod uwagę przyjęte do symulacji parametry materiałowe kleju Araldite 2014-2 (wytrzymałość w próbie rozciągania – 38 MPa). Być może Doktorantka zaprezentowała maksymalne wartości naprężeń dla całego połączenia, a nie dla spoiny połączenia i stąd prezentowane wartości są przewymiarowane;
- str. 89., Tab. 3.12., Tab. 3. 13. – uwaga jak wyżej, wartości dla spoiny połączenia są mocno przeszacowane;
- str. 95. – „...pokrycie dodatkową warstwą aluminium pomaga chronić przed *rdzewieniem* oraz stop staje się trwalszy...” – nazwa rdza jest potoczną nazwą procesów korozyjnych zachodzących w żelazie i jego stopach. Nawet w języku potocznym nie używa się tego terminu w odniesieniu do aluminium czy jego stopów, niewłaściwe wykorzystanie słowa w kontekście prezentowanego opisu;
- str. 97 vs. str. 99 – „Obróbkę strumieniowo-ścierną przeprowadzono korundem glinowym w formie F40 przy...” vs. „Obróbkę przeprowadzono z wykorzystaniem elektrokorundu 95A o średniej wielkości ziarna równej 0,27 mm...” – nie jest zrozumiałe czy opis dotyczy tego samego ziarna wykorzystywanego w piaskarce? Inne też są definiowane czasy obróbki: 60s vs. 20s oraz odległości dyszy od powierzchni blach: 150 mm vs. 100 mm?

- str. 134 – „...*próby dały najwyższe wyniki.*” – niewłaściwe sformułowanie – próby nie mogą dać wyników, personifikacja;
- str. 162 ÷ 167, Tab. 6.1 ÷ Tab. 6.5 – Tytuły tabel „*Wyniki badan zmęczeniowych i analiza statyczna...*” – powinno być *statystyczna*;
- str. 172 – „...*Rozproszenie energii w dodatkowej objętości kleju tj. w wcięciach i otworach ma znikomy wpływ poddając złącze pod pojedyncze obciążenie statyczne.*” – niezrozumiały zapis;
- str. 173 – „...*, ponieważ zastosowany klej ma nie co inne właściwości.*” – powinno być *nieco*;
- str. 174 – „*Na rysunku 6.6 przedstawiono...*” – prawdopodobnie chodzi o rys. 6.7;
- str. 175 – „*Środkowy obszar przelomu ma charakter zniszczenia kohezyjnego, natomiast obszar przelomu od strony działającego obciążenia...*” – mało precyzyjny zapis;
- str. 180 ÷ 186, Tab. 6.6 ÷ Tab. 6.10 – Tytuły tabel „*Wyniki badan zmęczeniowych i analiza statyczna...*” – powinno być *statystyczna*;
- str. 189 – „*Nie badano obszaru zmęczeniowa w zakresie od zero do kilku set cykli, zatem nie wiadomo...*” – niezrozumiały zapis;
- str. 191, str. 193 – „*Uwidocznione jest to w obszarze złącza przy krawędzi natarcia kleju, w którym ...*”, „*Przez wzgląd na charakterystyczną koncentrację naprężeń na krawędziach natarcia złącza, to właśnie na...*” – co to jest krawędź natarcia kleju? czy krawędź natarcia złącza?, niezrozumiały zapis.

4. Wniosek końcowy

Stwierdzam, że rozprawa doktorska Pani mgr inż. Katarzyny Łabno dotyczy aktualnego zagadnienia jakim jest poprawa trwałości zmęczeniowej połączeń klejowych oraz została zaplanowana, wykonana oraz napisana na dobrym poziomie naukowym i stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

Doktorantka jednocześnie wykazała, że posiada wiedzę z zakresu problematyki połączeń klejowych, potrafi planować i realizować badania oraz interpretować wyniki wyciągając przydatne wnioski, potwierdzając tym samym, że jest przegotowana do samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

Biorąc pod uwagę pracochłonność realizowanych testów, zakres i poziom recenzowanej pracy doktorskiej, jej bezpośredni związek z praktyką inżynierską, stwierdzam, że spełnia

ona wymagania stawiane rozprawom doktorskim w rozumieniu obecnie obowiązującej ustawy. Wnioskuje zatem o dopuszczenie mgr inż. Katarzyny Łabno do publicznej obrony Jej rozprawy.

A handwritten signature in blue ink, consisting of a large, loopy initial 'K' followed by several vertical strokes representing the surname 'Łabno'.