

POLITECHNIKA POZNAŃSKA
WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ
Instytut Mechaniki Stosowanej
ZAKŁAD WYTRZMAŁOŚCI MATERIAŁÓW I KONSTRUKCJI

dr hab. inż. Piotr PACZOS, prof. PP

ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań
ul. Jana Pawła II 24, Budynek A5,
61-139 Poznań
tel. +48 61 665 2325, fax. +48 61 665 2307
e-mail: piotr.paczos@put.poznan.pl

Poznań, 09.10.2024 r.

Recenzja nr 3/dr/PP
rozprawy doktorskiej mgr inż. Anny SZYMKOWIAK pt.
Metoda badań wytrzymałości złącza klejonego z zastosowaniem
próbki typu „sandwich”

Podstawa opracowania recenzji: pismo Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Bydgoskiej dr hab. inż. Łukasza Muślewskiego, prof. PBŚ z dnia 6 września 2024 roku oraz stosowna umowa o dzieło i rachunek.

Wymienione dokumenty odebrałem 13.09.2024 r.

Promotorem rozprawy doktorskiej jest dr hab. inż. Bogdan Ligaj, profesor PB.

1. Podstawowe dane dotyczące Kandydata.

Mgr inż. Anna Szymkowiak w roku 2009 ukończyła studia magisterskie na Uniwersytecie Kazimierza Wielkiego, na Wydziale Matematyki, Fizyki i Techniki w Bydgoszczy na kierunku matematyka. W roku 2013 ukończyła studia inżynierskie na Wyższej Szkole Informatyki w Łodzi, Wydział zamiejscowy w Bydgoszczy na kierunku Informatyka. Doktorantka posiada również przygotowanie pedagogiczne oraz doświadczenie w zakresie zarządzania oświatą.

2. Przedmiot rozprawy.

W ostatnich kilkadziesiąt lat w wielu krajach w Europie i na Świecie obserwuje się duże, stale wzrastające zainteresowanie stosowaniem połączeń elementów konstrukcyjnych z użyciem różnego rodzaju klejów. W wielu rozwiązaniach konstrukcyjnych połączenia klejone zastępują połączenia spawane oraz lutowane, a także połączenia gwintowe i nitowe. Jest to związane z właściwościami fizyko-chemicznymi klejów. Prognozuje się, że w roku 2100 zastosowanie połączeń klejonych w budowie maszyn może osiągnąć ok. 50%. Cytując za Autorką dysertacji: „Na podstawie analizy statystyk, opracowanych przez Europejskie Stowarzyszenie Producentów Klejów i Szczeliw FEICA opublikowało pierwszy w Europie podręcznik klasyfikacyjny dotyczący wyłącznie klejów i obszarów ich zastosowań.” Dopiero w roku 2008 rozszerzono standaryzację klasyfikacji o technologie szczeliw i zharmonizowano ją ze stosowaną w USA klasyfikacją ASC, co zapewniło porównywalność danych obu stowarzyszeń. W roku 2012 trzy wiodące konsorcja i stowarzyszenia rynku klejów oraz uszczelnaczy (ASC w USA, CATIA w ChRL i FEICA w Europie) utworzyło zunifikowany podręcznik

klasyfikacyjny, w którym odnotowano podział rynku na mniejsze obszary, zwiększono precyzję sformułowań ułatwiając tym samym analizę porównawczą, w tym gromadzenie oraz wyszukiwanie danych.

Prosta i ogólnie dostępna technologia klejenia, łatwość montażu i dobre właściwości wytrzymałościowe sprawiają, że połączenia klejone znajdują coraz szersze zastosowanie w wielu dziedzinach techniki, tj. w konstrukcjach budowlanych, konstrukcjach maszyn i pojazdów, życiu codziennym oraz wielu innych. Analizowana rozprawa doktorska wpisuje się swoim technicznym założeniem oraz swoją treścią w nurt poczynąń poznawczych i użytkarnych stanowiących istotę szeroko rozumianej inżynierii. Fakt ten jest potwierdzeniem trafności wyboru tematyki badawczej z punktu widzenia tak szeroko zarysowanej perspektywy. Identyfikacja usytuowania niniejszej pracy na tle omówionych zagadnień oraz przedstawienia głównych dróg rozwoju tego obszaru, w którym ona się mieści, pozwoli na osądzenie, czy Autorka trafnie wybrała tematykę badawczą.

W ramach realizacji rozprawy doktorskiej Autorka zaplanowała i wykonała testy empiryczne, których głównym celem była weryfikacja doświadczalna możliwości badań grubych złączy klejonych z zastosowaniem próbek typu „sandwich”. Doktorantka oceniając wytrzymałość złącza klejonego bazowała na wyznaczeniu odkształcenia i pracy niszczącej badane połączenie. W pierwszej kolejności wykonała badania zakładkowych próbek klejonych (90 szt.) a następnie przebadła próbki typu „sandwich” (60 szt.) Badania prowadziła w warunkach obciążeń statycznych na podstawie normy PN-EN 1465-2009 oraz w warunkach czteropunktowego zginania, gdzie parametrem opisującym energię potrzebną do uszkodzenia próbki była praca sił wenerycznych W . Przedmiotem recenzowanej rozprawy jest przedstawienie nowej autorskiej metody oceny uszkodzeń złączy klejonych w warunkach obciążeń statycznych bazującej na zastosowaniu próbek typu „sandwich” w odniesieniu do uzyskanych wyników badań doświadczalnych zakładkowych próbek klejonych. Omawiana w rozprawie doktorskiej metoda badań została opracowana z myślą o badaniu grubych złączy klejonych.

Wymienione okoliczności potwierdzają **trafność i sensowność wyboru tematyki badawczej**. Uzasadnieniem tej opinii jest nie tylko sam fakt usytuowania pracy na szerszym tle formułowanych obecnie wyzwań i wykonywanych badań, ale i to, że podejmowana w rozprawie doktorskiej szczegółowa tematyka rokuje duże nadzieje poznawcze, a także, co też ma szczególne znaczenie w kontekście prezentowanych badań, nadzieję na uzyskanie walorów użytkarnych.

3. Treść rozprawy.

Strukturę rozprawy stanowi siadem rozdziałów poprzedzonych wykazem najważniejszych symboli i skrótów, spis literatury (bibliografii) cytowanej w tekście zawierającej 132 pozycje oraz streszczenie w języku polskim i angielskim. Recenzowana praca zawiera 166 stron. Układ pracy jest prawidłowy i typowy dla prac doświadczalno - numerycznych. Jest to bardzo spójna tematycznie praca. **Tytuł dysertacji** jest zgodny z jej treścią. Wartościowym aspektem niniejszej dysertacji jest to, że została ona napisana w sposób bardzo przejrzysty, staranny bez większych błędów stylistycznych, interpunkcyjnych i edytorskich.

Rozdział pierwszy stanowi wstęp do rozprawy, w którym Autorka omówiła stosowane w Europie i na Świecie dokumenty dotyczące klasyfikacji klejów oraz obszarów ich zastosowań. Zwróciła również uwagę na inne akty prawne, które rozszerzono o technologie szczeliw i zharmonizowano je ze stosowaną w USA klasyfikacją ASC, co zapewniło porównywalność danych, które proponowało Europejskie Stowarzyszenie Producentów Klejów i Szczeliw FEICA.

Rozdział drugi składa się z sześciu podrozdziałów, w których Autorka przedstawiła informacje o klejach i procesach klejenia. Opisała szczegółowo klasyfikacje oraz podział stosowanych klejów, w tym właściwości fizyko-chemiczne procesu klejenia. Następnie Doktorantka przedstawiła zjawisko adhezji, napięcia powierzchniowego oraz energii powierzchniowej. W drugiej części tego podrozdziału pojawiły się informacje o wpływie wybranych czynników na wytrzymałość złączy klejonych oraz ich cechy konstrukcyjne. Podrozdział kończy się opisem metod badań złączy klejonych. W poszczególnych podrozdziałach rozdziału 2 pojawiają się pewne wnioski wypływające z analizy literatury, na podstawie, których Autorka scharakteryzowała lukę badawczą. Przedstawiona analiza stanu wiedzy pozwoliła Pani mgr inż. Annie Szymkowiak na sformułowanie celów badawczych.

W rozdziale trzecim Doktorantka opisała problem badawczy przedstawiając tezę badawczą, cel i zakres przeprowadzonych badań. Rozdział ten składa się z 3 podrozdziałów i został napisany bardzo zwięźle. Wnioskuje zatem, że co do treści rozprawy oraz jej merytorycznej poprawności nie można mieć zastrzeżeń. Autorka przedstawiła metodę oceny uszkodzenia złącza klejonego w warunkach obciążeń statycznych bazująca na zastosowaniu próbek typu „sandwich”, których postać geometryczna znacząco różni się od postaci próbek typu zakładkowego. Punktem odniesienia dla wyników badań doświadczalnych próbek typu „sandwich”, będą wyniki badań zakładkowych próbek klejonych. Metoda badawcza została opracowana z myślą o badaniach grubych złączy klejonych, gdzie zastosowanie próbek typu „sandwich” pozwoli na określenie wartości odkształcenia konstrukcji, przy której zaistnieje uszkodzenie złącza klejonego. Zaproponowana przez Doktorantkę metoda oceny bazuje na pomiarze odkształceń jednego z łączonych elementów pod wpływem monotonicznie narastającej wartości momentu zginającego. Wynikiem prowadzonych przez Doktorantkę badań było określenie wartości pracy (energii) powodującej uszkodzenie złącza klejonego. Sposób ten jak twierdzi Autorka nie pozwala jednak na określenie wytrzymałości złącza klejonego w takim rozumieniu, jak to jest często określane podczas badań próbek zakładkowych.

Rozdział czwarty to opis metody badań złączy klejonych z zastosowaniem próbek typu „sandwich”. Rozdział ten składa się z trzech różnych podrozdziałów. W pierwszym z nich opisane zostały ogólne uwagi dotyczące badań połączeń klejonych, następnie budowa próbek do badań typu „sandwich” i na koniec Autorka przedstawiła obliczenia numeryczne naprężeń zredukowanych w elementach badanych próbek oraz spoinach klejowych. Wydaje się, że ten podrozdział powinien być bardziej szczegółowo opisany i w opinii Recenzenta stanowić powinien odrębny rozdział pracy. Ta część wymaga pewnych wyjaśnień i uzupełnienia w czasie publicznej obrony niniejszej pracy doktorskiej. Nie mniej jednak na uznanie zasługuje fakt wykonania przez Autorkę wielu trudnych i czasochłonnych analiz numerycznych (81) dla złączy klejonych w różnych konfiguracjach spoin: płaskie, wklęsłe i wypukłe.

W rozdziale piątym Pani mgr inż. Anna Szymkowiak przedstawiła w sposób bardzo obszerny badania doświadczalne złączy klejonych, w tym zakładkowych połączeń klejonych. Opisała próbki użyte do badań oraz warunki i program badań. Następnie przedstawiała analizę wyników badań zakładkowych próbek klejonych przechodząc dalej do opisu prowadzonych badań z zastosowaniem próbek typu „sandwich”. W drugiej części tego rozdziału pojawia się dodatkowo opis metody przygotowania próbek typu „sandwich” wraz z projektem stanowiska badawczego. Każdorazowo po wykonanych badaniach Autorka kończy poszczególne podrozdziały analizą uzyskanych wyników zarówno dla próbek zakładkowych jak i próbek typu „sandwich”. Doktorantka przedstawiła weryfikację doświadczalną możliwości oceny grubych

złączy klejonych z zastosowaniem próbek typu „sandwich”, bazując na określeniu maksymalnej wartości odkształcenia konstrukcji oraz pracy niszczącej połączenie ΔW .

Realizując główny cel pracy Doktorantka przedstawiła ocenę opisując szczegółowo: wpływ grubości warstwy kleju oraz grubości łączonych elementów na wartość odkształceń ε_2 oraz pracę niszczącą złącze klejone ΔW w próbce typu „sandwich”, wpływ rodzaju materiału łączonych elementów na wartość odkształceń ε_2 oraz pracę niszczącą złącze klejone ΔW w próbce typu „sandwich”, wpływ grubości warstwy kleju oraz grubości łączonych elementów na wartość siły niszczącej F_{\max} oraz pracę niszczącą złącze klejone ΔW w zakładkowej próbce klejonej czy wpływ rodzaju zastosowanego materiału łączonych elementów na wartość siły niszczącej F_{\max} oraz pracę niszczącą złącze klejone ΔW w zakładkowej próbce klejonej. W konkluzji, zakończeniu rozdziału Pani mgr inż. Anna Szymkowiak przedstawia analizę porównawczą wyników badań uzyskanych dla próbek typu „sandwich” z wynikami dla zakładkowych próbek klejonych.

Ten rozdział w opinii Recenzenta został napisany i opracowany przez Doktorantkę najlepiej. Oprócz prezentacji nowego stanowiska badawczego rozdział ten zawiera przedstawienie wyników eksperymentalnych badań własnych oraz ich analizę. Poszczególne części prezentacji wyników badań i analiz zakończone są wnioskami syntetyzującymi informacje pozyskiwane z wykonywanych czynności badawczych, co doceniam jako niewątpliwy walor tej części rozprawy. Badania te Autorka podsumowała ciekawymi i użytecznymi wnioskami, a uzyskane wyniki stanowiły punkt odniesienia do weryfikacji metody badań wytrzymałości złączy klejonych z zastosowaniem próbek typu „sandwich”, którą przeprowadziła w rozdziale 6.

Rozdział szósty to szczegółowa analiza wyników badań. Wyniki przedstawione wcześniej w rozdziale piątym Pani mgr inż. Anna Szymkowiak poddała dogłębnej analizie statystycznej w celu oceny możliwości badań uszkodzenia złączy klejonych (wartości pracy niszczącej ΔW połączenia klejone) z zastosowaniem próbek typu „sandwich”. Opracowane wyniki badań zostały umieszczone w licznych tabelach oraz rysunkach przedstawionych w formie wykresów. Autorka wyznaczyła równania funkcji liniowej oraz wartości współczynnika determinacji R^2 , a analizę dotyczącą porównania dwóch grup uzyskanych danych przeprowadziła stosując test U Manna-Whitney'a oraz test t-Studenta. W konkluzji „zastanawiająco” dobrą zbieżność wartości różnic dla obydwu typów przebadanych próbek Autorka tłumaczy dużą starannością ich wykonania, podobnym okresem sezonowania oraz poprawnością wykonania badań doświadczalnych. Niewielki rozrzut uzyskanych wyników badań pozwolił Doktorantce na określenie wartości współczynnika, który będzie umożliwił przeliczenie wyników uzyskanych dla próbek typu „sandwich” na próbki typu zakładkowego.

Następnie w rozdziale siódmym Autorka podejmuje się podsumowania badań, które stanowią podstawę opracowania dysertacji. Badania obejmowały 81 prób numerycznych oraz 150 prób doświadczalnych, w tym 90 dla próbek zakładkowych i 60 dla próbek typu „sandwich”. Na końcu rozdziału siódmego Pani mgr inż. Anna Szymkowiak przedstawia wnioski i spostrzeżenia z ich realizacji oraz formułuje wnioski mogące stanowić punkt wyjścia do dalszych badań.

Bibliografia (Literatura) zamieszczona w końcowej części rozprawy zawiera łącznie 132 pozycje, w tym najnowsze publikacje z literatury światowej. W spisie literatury można znaleźć 3 pozycje z udziałem Autorki ważne dla problematyki niniejszej rozprawy doktorskiej oraz 1 patent i 2 współautorskie zgłoszenia patentowe. Oprócz wymienionych prac pojawiają się również normy (5) oraz odniesienia do stron internetowych (18). Reasumując Doktorantka zacytowała 100 pozycje prac naukowych opublikowanych po roku 2000, w tym 15 publikacji naukowych wydanych po roku 2018. Z 132 pozycji literaturowych 32 prace zostały

opublikowanych przed rokiem 2000. Dobór prezentowanych zagadnień jest prawidłowy i moim zdaniem w zupełności pozwala na rekonstrukcję dotychczasowego stanu wiedzy w rozpatrywanym zakresie oraz stanowi solidną podstawę dla określenia obszaru badań własnych. Jest to również odpowiednia baza wiedzy do sformułowania zagadnienia badawczego.

Na samym końcu opracowania pojawia się streszczenie w języku polskim i angielskim.

4. Ogólna ocena rozprawy.

Tytuł rozprawy doktorskiej przedstawionej do recenzji jest następujący: *Metoda badań wytrzymałości złącza klejonego z zastosowaniem próbki typu „sandwich”*. Na wstępie analizy rozprawy chciałbym przedstawić moją ocenę aktualności podjętego zagadnienia naukowego. Przeprowadzone badania doświadczalne pozwoliły Doktorantce potwierdzić możliwość realizacji oceny uszkodzenia złączy klejonych w warunkach obciążeń statycznych z zastosowaniem próbek typu „sandwich”. Świadczyć o tym może wystarczająca zgodność wyników uzyskanych badań dla próbek typu „sandwich” z wynikami badań dla zakładkowych próbek klejonych.

Na podstawie przeprowadzonej dotąd analizy można podjąć próbę rekonstrukcji **osiągnięcia naukowego rozprawy**. Jako elementy tego osiągnięcia widocznie odróżniające je od aktualnego stanu wiedzy w rozpatrywanej problematyce i w przyjętym zakresie badań oraz świadczące o oryginalności rozprawy uważam:

- Bardzo dogłębna i wieloaspektowa analiza stanu literatury w rzeczowym zakresie.
- Badania numeryczne z użyciem Metody Elementów Skończonych - wyznaczenie rozkładów naprężeń w elementach próbek typu „sandwich” o różnych, zmiennych parametrach geometrycznych połączeń klejowych w warunkach obciążeń statycznych.
- Badania doświadczalne złączy klejonych z zastosowaniem próbek typu zakładkowego.
- Projekt oraz budowa stanowiska badawczego dla próbek typu „sandwich”.
- Weryfikację doświadczalną opracowanej metody badań złączy klejonych z zastosowaniem próbek typu „sandwich” w warunkach obciążeń statycznych.
- Możliwość określenia wartości współczynnika umożliwiającego przeliczenie wyników uzyskanych dla próbek typu „sandwich” na próbki typu zakładkowego.

Na podkreślenie zasługuje fakt, że Autorka zastosowała w swojej pracy adekwatne do potrzeb formalne narzędzia dotyczące opracowania i prezentacji wyników, a także nowoczesną aparaturę badawczą w pełni odpowiadającą założonym celom badań doświadczalnych. Mgr inż. Anna Szymkowiak wykazała się bardzo dobrym opanowaniem warsztatu badawczego. Program badań doświadczalnych jest bogaty, obfitujący bardzo dużą liczbą uzyskanych danych. Autorka zastosowała nowoczesny aparat metodyczny właściwy do założonych celów oraz wykonał solidne badania stanowiskowe przedstawiając w bardzo zwartej formie bogaty materiał dowodowy. Uzyskane wyniki badań mogą mieć **walor praktyczny** o stosunkowo szerokim zastosowaniu.

Mgr inż. Anna Szymkowiak podjęła próbę wyraźnego określenia **problemu naukowego**. Na podstawie lektury pracy można stwierdzić, że rozważany w dysertacji problem naukowy, to relacja między wybranymi parametrami geometrycznymi, wytrzymałościowymi i energetycznymi (praca połączenia) badanych próbek klejonych typu zakładkowego oraz typu „sandwich” w próbie 4 pkt. zginania. Ten fragment pracy łącznie z analizą literatury odczytuję, jako fundament intelektualnej konstrukcji budowanej przez Autorkę. Sformułowany na stronie 57 **cel pracy** jest dobrze ugruntowany w przedstawionym później materiale i stanowi

uzupełnienie tej konstrukcji. Zasadniczą część rozprawy z punktu widzenia etapów badania naukowego stanowi rozdział piąty, w którym Autorka referuje **metodykę, wyniki i analizę wyników badań własnych**, tj. podrozdział 5.1 i 5.2.

Przedstawiona analiza rozprawy zawiera wystarczające, moim zdaniem przesłanki do sformułowania oceny. Treść rozprawy jest zgodna z tematem zaakceptowanym przez Radę Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Bydgoskiej. Podjęty temat jest ważny zarówno z poznawczych, jak i praktycznych względów i opracowany został w sposób prawie wyczerpujący. Sformułowane w niniejszej recenzji uwagi nie umniejszają wartości materiału dowodowego pracy, w większości albowiem odnoszą się do sposobu prezentacji uzyskanych wyników lub są podstawą do dyskusji z Autorką. Zatem nie powinny one stanowić podstawy do kwestionowania wartości pracy.

Pod względem metodycznym rozprawa jest poprawna. Literatura specjalistyczna została dobrana trafnie. Układ rozprawy i podział treści między poszczególne rozdziały jest logiczny. Zbiór pojęciowy, jakim posługuje się Autorka, jest w zasadzie poprawny. Strona ilustracyjna pracy jest dobrej jakości. Redakcja rozprawy jest poprawna. W dostarczonym do recenzji egzemplarzu stwierdziłem jednak nieliczne błędy edytorskie, redakcyjne i pewne nieścisłości.

Godna podziwu jest również pracowitość Doktorantki. Mgr inż. Anna Szymkowiak wykonała wartościową pracę badawczą i wykazała się dogłębną znajomością warsztatu naukowego. Doktorantka rozwija twórczo również dorobek promotora oraz całego zespołu badawczego Katedry Mechatroniki i Maszyn Roboczych Politechniki Bydgoskiej. Realizując niniejszą rozprawę doktorską Autorka dokonała trzech zgłoszeń patentowych do Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej dotyczących metodyki badań złączy klejonych oraz procesu wykonywania próbek. W konsekwencji tych zgłoszeń uzyskano jeden patent, a dwa rozwiązania oczekują na weryfikację Urzędu Patentowego.

W rozprawie Doktorantka zaplanowała i wykonała eksperymenty, w sposób czytelny przedstawiła ich wyniki, wykonała analizę otrzymanych rezultatów opatrując je stosownymi komentarzami. Udowodniła zatem, że potrafi w skuteczny sposób dokonywać analizy subtelnych zjawisk zachodzących i pojawiających się w złączach klejowych. W końcowej konkluzji Autorka formułuje wnioski i określa kierunki dalszych badań.

Na podstawie analizy rozprawy można stwierdzić, że Doktorantka jest przygotowana do prowadzenia samodzielnej pracy naukowej. Poszerzyła swoją ogólną wiedzę dotyczącą warsztatu badawczego w zakresie syntezy oraz analizy problemów badawczych w tym prowadzenia badań doświadczalnych i numerycznych.

Podsumowując moją ocenę stwierdzam, że rozprawa:

- spełnia wymóg oryginalnego rozwiązania przez Autorkę zagadnienia naukowego,
- spełnia wymóg wykazania ogólnej wiedzy teoretycznej w uprawianej dyscyplinie,
- oraz wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia przez Autorkę pracy naukowej.

Poza tym chciałbym postawić pytanie i prośbę o wyjaśnienie o nieco ogólniejszym charakterze, które mogłyby być przedmiotem wypowiedzi doktorantki oraz dyskusji w trakcie obrony:

1. Które ze sformułowanych wniosków uznałby Pani, jako bezpośrednio użyteczne i dlaczego?
2. Bardzo proszę odnieść się do ewentualnych kierunków dalszych badań w kontekście zaprezentowanych wyników badań.

5. Uwagi krytyczne.

Po zapoznaniu się z treścią rozprawy, chciałbym uzyskać odpowiedzi/wyjaśnienia na następujące kwestie oraz wyrazić swoje następujące wątpliwości natury merytorycznej:

1. Należy zaznaczyć, że Doktorantka przeprowadziła weryfikację dla ściśle określonych: cech geometrycznych próbek, sposobu ich wykonania i warunków realizacji badań, cyt. „*Możliwości wykorzystania próbek typu sandwich zweryfikowano dla określonych cech geometrycznych i materiałowych w warunkach obciążeń statycznych. Celowym jest przeprowadzenie oceny możliwości zastosowania próbek w badaniach w warunkach obciążeń zmiennych np. o wartości współczynnika asymetrii cyklu $R = 0$* ”. **Pytanie:** Czy i jakie inne cechy badanych próbek mogłyby mieć wpływ na uzyskane wyniki badań?
2. Jaki wpływ na uzyskane wyniki badań może mieć efekt odrywania, odklejania występujący czasami w trakcie obciążania konstrukcji wielowarstwowej? **Proszę o krótkie wyjaśnienie.**
3. Na stronie 58 Autorka w treści dysertacji pracę niszczącą złącze klejone oznacza jako ΔW po czym w kolejnym odnośniku pojawia się tylko oznaczenie W (bez delty). **Pytanie:** Czy te oznaczenia dotyczą jakiś innej pracy niszczącej złącze klejone czy są pewnym niedopatrzaniem edytorskim?
4. Pomimo pojawiających się w opracowaniu pewnych formuł wydaje się, że brakuje jednak w pracy, weryfikacji badań wstępnych z użyciem rozwiązań analitycznych złączy klejonych. **Pytanie:** Czy próby użycia metod analitycznych były podejmowane we wcześniejszych badaniach?
5. Na stronach 58 i 59 pojawiają się wartości grubości płaskowników: 2, 3, 4mm. **Pytanie:** Czy to są wartości rzeczywiste czy nominalne? Jak były mierzone i z jaką dokładnością?
6. Na stronie 65 Doktorantka napisała, cyt. „*Omawiana próbka przeznaczona jest do oceny wytrzymałości złączy klejonych w warunkach kontrolowanych odkształceń elementów konstrukcyjnych maszyn. Najkorzystniejszą formą obciążenia próbki jest czteropunktowe zginanie o monotonicznie narastającej wartości momentu zginającego.*” **Pytanie:** Dlaczego czteropunktowe zginanie jest najkorzystniejszą formą obciążenia próbki?
7. Na stronie 70 w podrozdziale dotyczącym zastosowania w obliczeniach Metody Elementów Skończonych pojawiają się stałe materiałowe takie jak: moduł Younga oraz liczba Poissona. **Pytanie:** Czy nie warto i nie powinno było przeprowadzić dodatkowych badań wytrzymałościowych w celu weryfikacji zastosowanych stałych materiałowych?
8. Modelowanie spoin klejowych w obliczeniach MES, cyt. „*Przyjęto także, że analiza numeryczna ma być realizowana na modelach bryłowych o wymiarach, które przyjęto na podstawie wstępnych wyników badań doświadczalnych*”. **To stwierdzenie w opinii Recenzenta jest niejasne i wymaga wyjaśnienia.**
9. Jakiego rozmiaru elementy skończone wybrano do analizy numerycznej MES i jaki wpływ mogłyby mieć na uzyskane wyniki badań? Jakie parametry siatki elementów skończonych użyto w obliczeniach MES? **Proszę o wyjaśnienie.**
10. Na stronach od 71 do 75 Autorka przedstawia mapy rozkładu naprężeń zredukowanych oraz w tabelach odpowiadające im wartości w odpowiednich punktach pomiarowych zaznaczonych na rys. 4.3. **Pytanie:** W jaki sposób i z jaką dokładnością odczytuje Doktorantka z map rozkładu naprężeń zredukowanych ściśle określone ich wartości dla S_1 , S_2 , S_3 i S_{klej} ?

11. Dlaczego w obliczeniach numerycznych rozpatrywano naprężenia von Misesa (naprężenia zredukowane) a nie naprężenia w kierunkach pomiaru odkształceń przez tensometry, czyli w kierunku x? Dlaczego nie analizowano naprężeń ścinających w złączu klejowym?
12. Podrozdział 5.1.2., strony 89, 90, 91 – Brakuje zdjęć (bardziej szczegółowy opis) z badań doświadczalnych próbek zakładkowych, np. zdjęć przygotowanych próbek, próbek umieszczonych w maszynie wytrzymałościowej, mechanizmów zniszczenia złącza klejonego, itp. **Bardzo proszę w odpowiedzi na moje pytanie o przedstawienie brakujących zdjęć oraz umieszczenie ich na prezentacji podczas publicznej obrony.**
13. Jak wyznaczano i z jaką dokładnością pole „powierzchni złącza”? Czy zawsze to było 150 mm^2 ? (str. 91)
14. Dlaczego do wykonania próbek typu „sandwich” wybrano stal 41Cr4, stop aluminium AW-574 i kleju Multibond-5824? Czy i jak zastosowanie innych materiałów wpłynęłoby na uzyskane wyniki badań?
15. Jak określono chropowatość po obróce mechanicznej powierzchni: dla stali $1,83 \mu\text{m}$ i dla aluminium $3,71 \mu\text{m}$?
16. Wymaga wyjaśnienia stwierdzenie na stronie 109, cyt. „Do badań przyjęto próbki o powtarzalnych wymiarach i małych odchyłkach równoległości sklejanym płaskownikom. Mechanicznie usunięto z nich wypływki kleju”. **Pytanie:** Co oznacza w rozumieniu Autorki: powtarzalne wymiary (tzn. jakie?) i małych odchyłkach równoległości (tzn. jakich?).
17. Na stronie 113 i 114 pojawiają się wie różne prędkości tłoka siłownika elektrycznego: $v=0,5 \text{ mm/s}$ i $0,1 \text{ mm/s}$ (6 mm/min). **Pytanie:** Na jakiej podstawie dobrano taką a nie inną prędkość obciążenia? Jak na uzyskane wyniki badań może wpływać zwiększenie lub zmniejszenia (zmiana) tej prędkości? (Wpływ prędkości obciążenia na uzyskane wyniki badań).
18. Czy można przeliczać posługując się „pewnym” współczynnikiem uzyskane wyniki z badań próbek „sandwiczowych” na próbki zagadkowe i odwrotnie – mając wyniki badań przeprowadzonych na próbkach zakładkowych przeliczać wartości wytrzymałości na próbki typu „sandwich”?
19. Bardzo proszę o **wyjaśnienia stwierdzenia**, cyt. „Należy także zauważyć, że belka M1 próbki typu sandwich musi być wykonana z materiału, który podczas obciążeń będzie odkształcał się w zakresie obowiązywania prawa Hooke’a. W innym przypadku, uzyskane wyniki nie pozwolą na właściwą ocenę parametrów uszkodzenia złącza klejonego.”
20. Bardzo proszę o **wyjaśnienia stwierdzenia**, cyt. „Analiza porównawcza wyników badań uzyskanych dla zakładkowych próbek klejonych z wynikami dla próbek typu sandwich wskazuje na bardzo dużą zgodność wyników dla wszystkich wariantów ich wykonania. Wartości różnic względnych mieszczącą się w zakresie od 24,0% do 24,7%. Niewielki rozrzut wyników badań pozwala na określenie wartości współczynnika, który umożliwi przeliczenie wyników uzyskanych dla próbek typu sandwich na próbki typu zakładkowego.” Czy można jednoznacznie dla przeprowadzonych prób wyznaczyć taki współczynnik? Jeśli tak to, jaką powinien mieć wartość?

6. Uwagi redakcyjne.

Całość rozprawy oceniam jako poprawną, choć mam drobne zastrzeżenia, co do zredagowania pracy. Pod względem edytorskim zauważyłem następujące nieścisłości lub pomyłki:

1. Doktorantka często używa słowa sandwich, niestety bardzo niekonsekwentnie: raz w tekście pojawia się to słowo w apostrofach („sandwich”) po czym w innej części opracowania bez.
2. Wykazie symboli pojawiają się powtórzenia, np. σ - naprężenie powierzchniowe metalu (str. 5) i σ - naprężenie powierzchniowe (str. 6) oraz różne wielkości czcionek (np. ε).
3. W wykazie skrótów zamiast S1, S1, S3 jako wartości naprężeń (nie wiemy jakich) raczej powinno oznaczać się symbolem σ (również strona 67, itd.).
4. Czasami pojawiają mało czytelne rysunki, np. str. 16 rys. 2.4 (zbyt mała czcionka).
5. Str. 7 – Autorka wymienia w jednym odnośniku po kilka omawianych prac, np. [6, 7, 16, 52, 68, 83, 89], strona 17 - [119, 25, 4, 3, 97, 118, 37, 34], strona 37 i odniesienie do prac [22, 70, 100] lub strona 62 - [2, 11, 64, 110, 105, 117], itd. Na ogół jednak przyjmuje się jeden lub dwa odnośniki, które odpowiadają zacytowanej lub zacytowanym i omawianym pracom.
6. Nielicznie zdarzają się na końcach linii wiszące spójniki tzw. sieroty. Nie jest to błąd, ale tekst wygląda mniej estetycznie.
7. Pod rys. 2.13 (str. 33) powinien być podpis „kąt zwilżania” a jest „kąt zbliżania”.
8. W kilku miejscach opracowania pojawią się różne akapity, np. strona 63.
9. Strona 67 – zamiennie moment gnący pisany z indeksem dolnym M_g po czym Mg.
10. Raczej używa się kursywy i indeksu dolnego do opisu wielkości fizycznych, tj. zamiast F_{max} raczej powinno być F_{max} , ΔW , ε_2 , itp.
11. Pojawiają się również w pracy nieliczne i niepotrzebne powtórzenia tekstu.
12. Autorka używa często sformułowania „spoin klejonych” – raczej w rozumieniu Recenzenta powinno używać się poprawnie zwrotu „spoin klejowych”, w zależności od kontekstu. **Bardzo proszę w odpowiedzi na moją uwagę o wyjaśnienie różnicy w pojęciach: złącze klejone a złącze klejowe.**

7. Wniosek końcowy.

Uważam, że recenzowana rozprawa doktorska opracowana została w sposób merytorycznie poprawny. Jest oryginalnym osiągnięciem Pani mgr inż. Anny Szymkowiak i stanowi istotny wkład w rozwój nad szeroko pojętą wytrzymałością elementów konstrukcji w tym badaniami połączeń klejowych. Powyższe argumenty świadczą o umiejętnościach Doktorantki w zakresie samodzielnego prowadzenia badań naukowych oraz wskazują na Jej sporą wiedzę w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn a wg nowej kwalifikacji inżynieria mechaniczna. W świetle dokonanej analizy i sformułowanych ocen stwierdzam, że rozprawa mgr inż. Anny Szymkowiak pt. *Metoda badań wytrzymałości złącza klejonego z zastosowaniem próbki typu „sandwich”*, spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące w tym względzie aktualne przepisy wprowadzające ustawę z dnia 3 lipca 2018r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018 poz. 1669) zachowującej w mocy art. 27 ust. 2 pkt 1 ustawy z dnia 14.03.2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. Nr 65, poz. 595, z późn. zm.) i może stanowić podstawę do nadania jej Autorce stopnia naukowego doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie *Inżynieria Mechaniczna (poprzednio Budowa i Eksploatacja Maszyn)*. Może być, zatem dopuszczona do publicznej obrony.

Jednocześnie, zgodnie z wyżej wyrażoną wysoką oceną pracy, zawierającej elementy oryginalne, które stanowią istotny wkład Kandydatki w ocenę, weryfikację oraz zaproponowanie procedury badawczej połączeń klejowych, a także biorąc pod uwagę aplikacyjne walory dysertacji, stawiam wniosek o jej wyróżnienie.

09.10.2024r.

Piotr PACZOS

Piotr PACZOS