

dr hab. inż. Jarosław Gałkiewicz, prof. PŚk
Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn
Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn
Politechniki Świętokrzyskiej
Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7
25-314 Kielce

Kielce, dn. 17-05-2021

RECENZJA

rozprawy doktorskiej Mgr inż. PAWŁA MAĆKOWIAKA pod tytułem "Analiza wytrzymałości i trwałości zmęczeniowej zakładkowych połączeń klejonych wykonanych z materiałów o różnych właściwościach mechanicznych", wykonanej pod kierunkiem dra hab. inż. BOGDANA LIGAJA z Wydziału Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego im. J. J. Śniadeckich w Bydgoszczy

Opis identyfikacyjny: rozprawa doktorska w postaci zwartego wydawnictwa sygnowanego przez Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. J. J. Śniadeckich w Bydgoszczy (2021).

Podstawa formalno-prawna:

- pismo prof. dr hab. inż. Dariusza Borońskiego, Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego im. J. J. Śniadeckich w Bydgoszczy z dnia 4 maja 2021 (bez sygnatury),
- Ustawa z dnia 3 lipca 2018r. - Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018 poz. 1669),
- Ustawa o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. z 2017 r., poz. 1789),
- Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19. stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz.U. poz. 261).

OCENA PRACY DOKTORSKIEJ

A. Wprowadzenie

Głównym zamierzeniem Autora rozprawy była ocena wytrzymałości statycznej i zmęczeniowej klejonych połączeń zakładkowych na przykładzie połączeń wykonanych klejem Plexus MA300. Założono, iż wytrzymałość i trwałość połączeń klejonych zależy od sztywności łączonych elementów. Tematyka podjętego zagadnienia lokuje się w ramach dziedziny nauk inżyniersko-technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

Mimo, że pierwsze przypadki wykorzystania klejów datuje się na 200000 lat przed naszą erą to dopiero okres II wojny światowej spopularyzował ten typ połączeń. Rozwój chemii doprowadził do powstania klejów o bardzo różnych właściwościach co znacznie rozszerzyło zakres ich stosowania. Jednym

z najbardziej efektywnych zastosowań klejów było mocowanie osłony termicznej na poszyciu wahadłowców. Innym przykładem są konstrukcje prezentowane na stronie APA – The Engineered Wood Association. Prezentowane tam mosty przekraczają 150 metrów rozpiętości a budowane są z dźwigarów powstałych z klejonego drewna. Pokazuje to w jak ekstremalnych warunkach i do jak odpowiedzialnych funkcji współcześni konstruktorzy potrafią wykorzystywać kleje. W świetle tych faktów kluczowe wydaje się określenie wytrzymałości i trwałości klejów oraz parametrów wpawających na nie.

Pracę na stopień Autor rozpoczął od zwięzłego przedstawienia aktualnego stanu wiedzy z zakresu analitycznego i doświadczalnego określania rozkładu naprężeń i wytrzymałości zakładkowych złączy klejonych. Na tej podstawie sformułował hipotezę badawczą, cele i główne zadania prowadzące do uzyskania odpowiedzi odnośnie postawionej hipotezy. Następnie opisał metodykę badań własnych (eksperymentalnych i numerycznych) oraz uzyskane rezultaty. Rozprawę zakończono wnioskami z przeprowadzonych badań oraz zaleceniami co do kierunków dalszych badań.

Podsumowując zamierzenia Autora pracy i mając na uwadze stan wiedzy należy przyjąć, iż zagadnienie wytrzymałości i trwałości połączeń klejowych jest ambitnym, aktualnym i istotnym problemem w zakresie badań podstawowych i stosowanych. Wynika to z dynamiki rozwoju tego typu połączeń, które stają się coraz bardziej popularne w praktycznych zastosowaniach a próby opisu rozkładu naprężeń z złącza i określania ich trwałości mają interdyscyplinarny charakter, gdyż łączą w sobie zagadnienia z zakresu fizyki, mechaniki teoretycznej i eksperymentalnej, inżynierii materiałowej oraz budowy maszyn. Nie można tu pominąć aspektów ekonomicznych i społecznych rozważanego zagadnienia. Poszukiwanie poprawnego modelu zjawiska i szerzej skutecznego prognozowania żywotności obiektów jest bowiem niezwykle zasadne. Pozwala to więc stwierdzić, że wybór tematyki badawczej zawartej w przedłożonej rozprawie jest w jak najbardziej aktualny naukowo i aplikacyjnie.

B. Charakterystyka pracy

Praca doktorska składa się z sześciu rozdziałów i 20 podrozdziałów oraz wykazu literatury i streszczeń w języku polskim i angielskim. Monografia obejmuje 144 strony, zawiera 115 rysunków oraz 32 tabele. Autor skorzystał ze 137 pozycji literaturowych, wśród których można wyróżnić 11 prac których jest współautorem, a stanowi je 8 artykułów (w tym jeden z listy A MNiSW), jeden patent i 2 zgłoszenia patentowe.

W bardzo krótkim pierwszym rozdziale (Wstęp) Autor wyjaśnia istotę tematyki, którą zamierza się zająć.

Drugi rozdział stanowi przegląd aktualnego stanu wiedzy. Pan Paweł Maćkowiak przytacza w nim klasyfikacje klejów, a następnie przechodzi do omówienia analitycznych metod wyznaczenia rozkładu naprężeń w zakładkowych połączeniach klejonych. Rozpoczyna od najprostszego

podejścia inżynierskiego, a następnie przechodzi do rozwiązań proponowanych przez Volkersena, Golanda-Reissnera i Adamsa-Peppiatta.

Dalej przedstawiono metody oceny wytrzymałości połączeń klejonych wykorzystując głównie prace M. Porębskiej i A. Skorupy oraz zespołu L.F.M. da Silva, D.A. Dillard, B.R.K. Blackman i R.D. Adams.

W kolejnym rozdziale, moim zdaniem zbyt krótkim, Autor bardzo zwięźle przedstawia problematykę numerycznego modelowania zakładkowych połączeń klejonych.

Następna część pracy stanowi przegląd popularnych kryteriów zniszczenia połączeń klejonych. Autor wymienia 5 kryteriów i każdemu z nich poświęca około pół strony.

Po przedstawieniu kryteriów zniszczenia Doktorant przedstawia metody badania własności klejów i połączeń klejonych. Zwrócono uwagę na przygotowanie próbek, rozbieżność w uzyskiwanych wynikach i braki w badaniach w zakresie badania własności klejów, które widoczne są w literaturze. W części dotyczącej trwałości połączeń klejonych przytoczone zostało szereg artykułów prezentujących wpływ różnych czynników na wytrzymałość i trwałość połączenia.

W rozdziale trzecim (Cel i zakres pracy) Autor wyjaśnił jakie czynniki doprowadziły Go do podjęcia tematu jakim jest badanie własności mechanicznych połączeń klejonych.

Sformułowano hipotezę badawczą, która zakłada że "wytrzymałość i trwałość zakładkowych połączeń klejonych wykonanych klejem metakrylowym Plexus MA300, w których przełom zniszczenia jest kohezyjny, zależy od sztywności łączonych elementów".

Aby potwierdzić zaproponowaną hipotezę zaproponowano plan badawczy, który zostanie zrealizowany poprzez osiągnięcie 5 celów obejmujących: opracowanie metodyki badań, przeprowadzenie badań statycznych i zmęczeniowych na próbkach odlewanych z kleju oraz na połączeniach klejonych w różnych konfiguracjach, wyznaczenie rozkładów naprężeń w połączeniach opisywanymi wcześniej metodami oraz wyznaczenie rozkładów za pomocą metody elementów skończonych.

Najobszerniejszy jest rozdział czwarty (Badania doświadczalne) i rozpoczyna się od przedstawienia programu badawczego. Pierwszym etapem badań było określenie własności klejów i materiałów użytych w połączeniach. W celu wykonania próbek z kleju metakrylowego i kleju epoksydowego do rozciągania zaprojektowano i stworzono specjalną formę. Zupełnie inną formę wykonano dla próbek z kleju poliuretanowego. Dużo łatwiejsze było wykonanie próbek do prób ściskania. Zarówno próbę rozciągania jak i ściskania wykonano zgodnie z odpowiednimi normami, ale dodatkowo w badaniach wykorzystano cyfrową korelację obrazu co pozwoliło uzyskać mapę odkształceń. Niestety użyto tylko jednej kamery co nie pozwoliło na zebranie informacji o przemieszczeniach w kierunku prostopadłym do powierzchni (szyjce). Przewężenie mierzono za pomocą ekstensometru poprzecznego. Porównanie własności mechanicznych i użytkowych klejów pozwoliło na wybranie najodpowiedniejszego do dalszych badań kleju metakrylowego Plexus MA300.

Kolejnym krokiem było przebadanie własności łączonych materiałów, którymi były stal C45, stop aluminium AW-5754 oraz tworzywo sztuczne ABS. Badania przeprowadzono zgodnie z normą na próbkach płaskich.

Do przebadania własności statycznych połączeń zakładkowych zaprojektowano stanowisko, które umożliwiało wykonywanie powtarzalnych próbek połączeń zakładkowych. Program badawczy obejmował przetestowanie wielu konfiguracji różniących się rodzajem łączonych materiałów i ich grubości, natomiast sama spoina miała zawsze te same rozmiary. Analiza otrzymanych wyników potwierdziła zależność między sztywnością łączonych elementów i wytrzymałością połączeń. Dodatkowo stwierdzono zależność między sztywnością elementów, a mechanizmem niszczenia połączenia. W połączeniach sztywniejszych elementy spoiny ulegały zniszczeniu wskutek dekohezji, natomiast w tych bardziej podatnych klej ulegał częściowemu uplastycznieniu i pojawiały się ślady adhezji w warstwie kleju. Niestety, połączenia w których wykorzystano ABS nie uległy zniszczeniu wskutek zbyt małego przekroju łączonych elementów. Siła niszcząca łączony element (z ABS) była niższa niż obciążenie krytyczne dla połączenia.

Druga część programu badawczego obejmowała określenie trwałości zmęczeniowej. Badaniom poddano klej Plexus MA300 oraz wykonane połączenia zakładkowe elementów ze stali C45 i stopu aluminium AW-5754. Do badań zmęczeniowych ze względu na sposób niszczenia próbek z udziałem ABS postanowiono nie wykorzystywać tego materiału. Badania prowadzono przy sterowaniu siłą ze współczynnikiem asymetrii cyklu $R=0,1$. Podobnie jak w przypadku monotonicznych obciążeń potwierdzono zależność między sztywnością na rozciąganie i zginanie, a trwałością zmęczeniową. Stwierdzono również, że dla trwałości 5 mln cykli obciążenie jest na tyle małe, że sztywność elementów łączonych nie ma znaczenia i do projektowania można wykorzystywać jedną wartość naprężeń dopuszczalnych.

Ponieważ podstawą oceny wytrzymałości jak i trwałości zmęczeniowej jest poziom naprężeń stycznych w złączu, istotne jest jakie wartości maksymalne uzyskuje się korzystając z różnych metod analitycznych. Temu zagadnieniu Autor poświęcił pierwszy podrozdział rozdziału 5. Okazało się, że dla jednego przypadku obciążenia wyniki między różnymi metodami wahają się od 4% do 17% i są takie same zarówno dla obciążeń statycznych jak i zmęczeniowych. Dużo większe różnice w poziomie naprężeń stycznych uzyskiwano w obrębie jednej metody analitycznej wykorzystanej do wyznaczenia naprężeń w złączach różnego typu. W tym wypadku rozbieżności uzyskiwane dla przypadków statycznych były zbliżone do wyników uzyskiwanych dla najkrótszych trwałości zmęczeniowych, a poziom różnic zmniejszał się z poziomem naprężenia. Różnice te zostały usprawiedliwione niedoskonałością metod analitycznych nieuwzględniających nieliniowości zagadnienia wywołanego odkształceniami plastycznymi oraz brakiem uwzględniania złożonego stanu naprężenia jaki niewątpliwie się pojawia w spoinie.

Druga część rozdziału 5 poświęcona jest numerycznemu wyznaczaniu rozkładów naprężeń w spoinie. Do obliczeń wykorzystano program ABAQUS w wersji 6.6.4. Obliczenia przeprowadzono dla zagadnienia w płaskim stanie

odkształcenia stosując elementy CPE4R (liniowy element o zredukowanym poziomie całkowania). W wyniku obliczeń uzyskano rozkłady naprężeń stycznych, naprężeń σ_y (zbliżonych do normalnych w złączu) odkształceń stycznych oraz w kierunku y na granicy klej-łączony materiał oraz w środkowej warstwie kleju. Autor dokonał szczegółowej analizy uzyskanych wyników, nie mniej brakuje mi w podsumowaniu połączenia obu podrozdziałów przez porównanie wyników uzyskiwanych numerycznie z rozkładami otrzymywanymi metodami analitycznymi.

Ostatnim rozdziałem są Wnioski, w których Autor zawarł główne rezultaty swojej pracy, które potwierdzają stawianą tezę oraz zalecenia dotyczące szacowania wytrzymałości statycznej i trwałości zmęczeniowej połączeń klejonych. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że tylko w przypadku obciążenia zmęczeniowego dla największych trwałości sztywność łączonych elementów jest praktycznie nieistotna. Do szacowania wytrzymałości połączeń klejonych w przypadku obciążeń statycznych najlepsze jest kryterium maksymalnych odkształceń normalnych, zaś w przypadku trwałości zmęczeniowej powyżej 5 mln cykli najlepszym i najpraktyczniejszym jest podejście inżynierskie. Odnosząc się do postawionych celów Doktorant podkreślił jakość opracowanej metody wykonywania próbek do badań właściwości mechanicznych klejów, która pozwoliła uzyskiwać wysokiej jakości połączenia o powtarzalnych podczas pomiarów cechach. Wytrzymałość połączeń klejonych zależy od mechanizmu zniszczenia połączenia, a największą wytrzymałość uzyskuje się dla przełomu kohezyjnego. Obliczenia numeryczne ujawniły, że największe naprężenia występują na granicy klej-łączony element, a wielkość strefy plastycznej w warstwie kleju silnie zależy od sztywności elementów. Im ten parametr jest mniejszy, tym mniejszą strefę plastyczną obserwuje się w warstwie kleju.

Rozdział kończy się sugestiami dotyczącymi dalszych badań. Do najważniejszych wniosków zaliczam ten o konieczności kontynuowania prac zmierzających do ustanowienia nowego kryterium zniszczenia umożliwiającego dokładniejsze szacowanie wytrzymałości połączeń klejonych wobec niedoskonałości aktualnie stosowanych metod. Ważny jest również wniosek dotyczący rozszerzenia badań na przypadki skręcania i ścinania co wpisuje się w aktualne tendencje uwzględniania stanu naprężenia przy szacowaniu wytrzymałości.

C. Uwagi krytyczne i sugestie

1. We wzorze 2.18 użyto grubości warstwy kleju. W pracy J. Kuczmaszewskiego w odpowiednim wzorze korzystano z grubości łączonych elementów. Zdrowy rozsądek podpowiada, że będzie tu działał moment pary sił. W prawdzie w pracy Kuczmaszewskiego też jest błąd w oznaczeniach, ale opis rozwiewa wątpliwości.
2. Nie wyjaśniono oznaczeń we wzorze 2.19.
3. Z pracy zrozumiałem, że do cyfrowej korelacji obrazu wykorzystywano tylko jedną kamerę co pozbawiło Autora informacji o trzecim wymiarze i do badania przewężenia potrzebny był ekstensometr poprzeczny. Interesuje mnie dlaczego nie próbowano obserwować połączeń podczas testu z boku, szczególnie wariantów z grubszymi elementami.

- Pozwoliłoby to uzyskać przynajmniej przybliżoną informację o odkształceniach w pobliżu strefy kohezji?
4. Na stronie 55 pisząc o próbkach poddanych ściskaniu (upsetting test) Doktorant napisał, że występowanie wewnętrznych i zewnętrznych pęknięć świadczą o większej kruchości materiału. Tymczasem na Rys. 4.20 widać pęknięcia promieniowe, które powstały na skutek za dużych naprężeń obwodowych. Co do samego niszczenia próbek poddanych ściskaniu, zwykle odkształcenie krytyczne w momencie inicjacji procesu zniszczenia jest większe, gdyż jest odwrotnie proporcjonalne do trójosiowości naprężeń, która to wielkość w tej próbie jest ujemna. Co dokładnie skłoniło Autora do stwierdzenia, że materiał jest bardziej kruchy?
 5. Wyniki próby ściskania zależą od tarcia między powierzchniami próbki i docisku. Czy podczas prób stosowano jakieś przekładki zmniejszające współczynnik tarcia?
 6. Na stronie 60 Doktorant stwierdził, iż kleje metakrylowy i epoksydowy posiadają wyraźne granice plastyczności. Śledząc wykresy rozciągania dla wspomnianych klejów (Rys.4.13 i 4.18 lub 4.27) taka uwaga budzi zdziwienie. Na wykresach widać maksimum, które uznaje za wytrzymałość doraźną. W tym wypadku natomiast należało wyznaczyć umowną granicę plastyczności. Norma ASTM D638 – 14, która dotyczy zbliżonych własnościami tworzyw sztucznych zaleca wyznaczenie w przypadku materiałów charakteryzujących się łagodną krzywizną umownej granicy plastyczności. Ewentualnie za punkt płynięcia uważa się pierwszy punkt na wykresie rozciągania, w którym przyrost odkształcenia następuje bez przyrostu naprężenia. W tym przypadku byłby to punkt w maksimum. Wspomniane wykresy po osiągnięciu maksimum właściwie monotonicznie maleją więc na jakiej podstawie uznano, że wspomniane materiały posiadają wyraźną granicę plastyczności i jak wyznaczono jej wartość?
 7. Podczas badania połączeń z udziałem ABS dochodziło do zniszczenia elementu wykonanego z ABS. Oznacza to, że podczas testu określano właściwie wytrzymałość ABS przy zginaniu mimośrodowym. Dlaczego nie próbowano wykonać grubszych elementów z ABS tak, aby zmniejszyć naprężenia w pasku?
 8. Na stronie 96 Autor zauważył, że eliminowanie punktów ze zbioru powoduje wzrost wskaźnika determinacji prostej regresji. Jest to raczej naturalne zjawisko.
 9. Obliczenia numeryczne zwykle poprzedzane są analizą jakości siatki. W tym wypadku jest to o tyle ważne, iż na brzegach mamy do czynienia z osobliwością, która powoduje koncentrację naprężeń a wtedy poziom uzyskiwanych naprężeń bardzo zależy od wielkości elementu. Czy dokonano wstępnej analizy, która pozwoliła przyjąć wielkość siatki na poziomie 0,1mm?
 10. Przenoszenie obciążenia niszczącego z badań zmęczeniowych do analizy statycznej to dość ryzykowne zadanie. Odkształcenia podczas testów zmęczeniowych zmieniają się w dość nieprzewidywalny sposób i określenie pola mechanicznego przed momentem zniszczenia jest niemożliwe do określenia, a co ważniejsze nie jest ono adekwatne polu

mechanicznemu, które tworzy się podczas monotonicznego obciążania. Czy ten aspekt natury procesu zmęczenia był uwzględniany w obliczeniach?

11. Co robił program o którym wspomniano na stronie 90?

12. Pod względem ortografii praca stoi na bardzo dobrym poziomie. Wprawdzie już w trzeciej linijce Wstępu pojawił się błąd w słowie "możliwościami", ale był to jedyny błąd ortograficzny jaki zauważono. Klika razy odnotowano nieprawidłową odmianę nazwisk (na stronie 10 powinno być McBain'a oraz notorycznie nieodmienne nazwisko Tresci – strony: 8, 38, 119 x3, 120). W pracy pojawiło się dość dużo literówek:

- a. strona 17 pod wzorem 2.1: "odkształcenie",
- b. strona 21 pod wzorem 2.16: "naprężeń",
- c. strona 23 na wzorem 2.20: "normalnych", po τ_x brakuje przecinka
- d. brak legendy dla Rys. 2.12,
- e. strona 28 pod wzorem 2.36: "staje",
- f. strona 30, linia 14: "średniego",
- g. strona 31, linia 2: niepotrzebny przecinek
- h. strona 37, linia 3: "Połączeń",
- i. strona 45, linia 10: "wyznaczenia",
- j. strona 50, linia 5: "średnice",
- k. strona 57, linia 2: "plastyczności",
- l. strona 63, linia 7 od dołu: "wyznaczanych",
- m. strona 75, linia 12: bez przecinka,
- n. strona 87, linia 7: "odległości",
- o. strona 87, linia 15: "DFFITs",
- p. strona 90, linia 5 pod tabelą 4.14 ucięte zdanie,
- q. strona 95, linia 3: "Zastosowanie",
- r. strona 96, linia 13: "ostatniego" i "nieustalonego",
- s. strona 96, linia 26: "zależności",
- t. strona 96, linia 28: "zależności",
- u. strona 101, linia 7: "występują",
- v. strona 102, tabela 4.22: wskaźnik determinacji dla Kleju nie wyrównany
- w. strona 105, linia 1: "klejonych",
- x. strona 112, linia 4: "zależnością",
- y. strona 112, linia 3 od dołu: "uwzględnia",
- z. strona 113, linia 5: bez przecinka
- aa. strona 114, linia 8 od dołu: błędne oznaczenie typu elementów
- bb. strona 114, linia 8 od dołu: "równa",
- cc. strona 128, linia 16: "sztywności",
- dd. strona 128, linia 6 od dołu: "opisywanego",
- ee. strona 129, linia 1: "wykres",
- ff. strona 129, linia 6 od dołu: "obciążenia",
- gg. strona 129, drugi punkt powinien być zakończony kropką.

PODSUMOWANIE

Przedstawioną pracę o tytule "Analiza wytrzymałości i trwałości zmęczeniowej zakładkowych połączeń klejonych wykonanych z materiałów o różnych właściwościach mechanicznych", niezależnie od zgłoszonych uprzednio uwag, oceniam całościowo jednoznacznie i zdecydowanie pozytywnie. Zaprezentowana w pracy tak szczegółowa analiza zachowania klejów i połączeń klejonych jest ambitnym i ważkim zagadnieniem w zakresie badań podstawowych i stosowanych. Tematyka jest bardzo aktualna, a praktyczne rezultaty podwyższają jej wartość.

Praca ma charakter zarówno eksperymentalny jak i obejmuje szerokie spektrum zagadnień z zakresu analizy i modelowania. Walory rozprawy w tych obszarach mają kluczowe znaczenie dla wysokiej oceny wysiłków Doktoranta.

Wyraźnie sformułowano cel i konsekwentnie rozwiązano zadania szczegółowe. Szczególną wartość pracy należy upatrywać w spójnym i logicznym połączeniu badań wytrzymałościowych z podejściem analitycznym i modelowaniem z użyciem MES. Pozwala to stwierdzić, iż teza pracy została dowiedziona, a cele rozprawy osiągnięte. Monografia wyróżnia się ponadto pozytywnie pod względem poziomu edycji, zarówno w zakresie tekstu jak i elementów graficznych.

*Mając na uwadze wszystkie wymienione powyżej aspekty stwierdzam, że przedstawiona do oceny praca spełnia wymagania stawiane przez Ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. z 2017 r., poz. 1789) i **może być podstawą do nadania stopnia doktora nauk technicznych w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna**. Wnoszę jednocześnie o dopuszczenie recenzowanej rozprawy do publicznej obrony.*

dr hab. inż. Jarosław Gałkiewicz, prof. PŚk

