

Prof. dr hab. inż. Wojciech Kacalak
Politechnika Koszalińska

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Pawła Maćkowiaka

ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCI I TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ ZAKŁADKOWYCH POŁĄCZEŃ KLEJONYCH WYKONANYCH Z MATERIAŁÓW O RÓŻNYCH WŁAŚCIWOŚCIACH MECHANICZNYCH

Promotor: dr hab. inż. Bogdan Ligaj

Katedra Mechatroniki, Wydział Inżynierii Mechanicznej
Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. J. J. Śniadeckich w Bydgoszczy

Koszalin, czerwiec 2021

Prof. dr hab. inż. Wojciech Kacalak
Politechnika Koszalińska

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Pawła Maćkowiaka

ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCI I TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ ZAKŁADKOWYCH POŁĄCZEŃ KLEJONYCH WYKONANYCH Z MATERIAŁÓW O RÓŻNYCH WŁAŚCIWOŚCIACH MECHANICZNYCH

Promotor: dr hab. inż. Bogdan Ligaj

Katedra Mechatroniki, Wydział Inżynierii Mechanicznej
Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. J. J. Śniadeckich w Bydgoszczy

1. Ocena tematu oraz hipotezy i zakresu pracy

Rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Maćkowiaka zawiera osiągnięcia naukowe w zakresie dyscypliny budowa i eksploatacja maszyn, które w pełni zawierają się w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. W ocenianej rozprawie przedstawiono analizę wytrzymałości zmęczeniowej oraz wyniki badań trwałości zakładkowych połączeń klejonych dla różnych przypadków kojarzenia łączonych elementów.

Połączenia klejone wykazują wiele zalet i są coraz częściej stosowane, mimo niedostatków w modelowaniu, ocenie i prognozowaniu ich wytrzymałości i trwałości. Niedostatki te wynikają z dość wysokiego stopnia zmienności parametrów połączeń, uzależnionych od cech materiałów, klejów, właściwości powierzchni w strefie połączenia, wpływu czasu i warunków eksploatacji.

Nie są dostatecznie poznane również mechanizmy kumulacji przyczyn i propagacji uszkodzeń w połączeniach. Poważnym utrudnieniem w procesach poznawczych jest niepewność, wynikająca ze sposobu wytwarzania połączenia oraz zjawisk w strefach kontaktu łączonych materiałów i kleju. Ponadto na złożoność analizowanych problemów wpływa jeszcze to, że można wyróżnić tysiące substancji klejących, w tym wiele

o dużej przydatności technicznej, a przy tym możliwe jest wpływanie na ich właściwości z użyciem wypełniaczy i modyfikatorów.

Cel pracy oceniam pozytywnie. Hipoteza pracy: *Wytrzymałość i trwałość zakładkowych połączeń klejonych wykonanych klejem metakrylowym Plexus MA300, w których przełom zniszczenia jest kohezyjny, zależy od sztywności łączonych elementów, jest sformułowana dość ostrożnie, gdyż nie zawiera na przykład stwierdzenia, że wytrzymałość połączenia zwiększa się wraz ze wzrostem sztywności łączonych elementów dla liczby cykli 10^4 , ale też nie maleje, ze wzrostem sztywności łączonych elementów, dla dużej liczby cykli.*

Wybór zakresu badań został poprawnie uzasadniony koniecznością uzyskania bardzo wysokiego stopnia poznania i zdefiniowania podstaw wyznaczania wytrzymałości i trwałości zmęczeniowej.

W obecnym stanie wiedzy o wytrzymałości i trwałości zmęczeniowej połączeń klejonych, należy podkreślić istotne znaczenie empiryzmu, jako sposobu tworzenia i ulepszania założeń do modelowania opisywanych połączeń.

Znaczenie empiryzmu w ocenianej pracy wynika głównie z trzech przesłanek. Pierwszą jest postęp w metodach badań, druga związana jest z rosnącym udziałem zastosowań połączeń klejonych w tworzeniu postępu w budowie wielu układów technicznych, a trzecia przesłanka dotyczy znaczenia aplikacyjnego oraz definiowania podstaw modelowania mechanizmów kumulacji i współzależności elementarnych oddziaływań zjawisk towarzyszących eksploatacji takich układów.

W pierwszej części pracy opisano analityczne metody wyznaczania wartości naprężeń w zakładkowym połączeniu klejonym, a następnie metody modelowania numerycznego takich połączeń. Oceniono wyniki opublikowane przez innych badaczy w zakresie kryteriów zniszczenia zakładkowych połączeń klejonych. Podkreślono brak jednoznacznego obliczeniowego kryterium zniszczenia połączeń w warunkach obciążeń przyrastających monotonicznie, a także obciążeń zmiennych (str. 41).

Doktorant określił stan wiedzy dotyczącej właściwości połączeń z użyciem różnych typów klejów. Wykazał, że wiedza o właściwościach połączeń z użyciem klejów metakrylowych, stosowanych coraz częściej, jest fragmentaryczna i nie obejmuje trwałości zmęczeniowej.

W dalszej części pracy przedstawiono metodykę badań, którą oceniam pozytywnie. Opisane zostały wyniki badań klejów, badania statyczne materiałów łączonych i klejonych połączeń zakładkowych.

Część eksperymentalna pracy zawiera wyniki badań w warunkach obciążeń statycznych, w tym badania kleju metakrylowego Plexus MA300. Były to badania podstawowe wynikające z celu pracy, a ponadto przeprowadzono badania kleju epoksydowego Epidian 53+Z1 i kleju poliuretanowego Multibond 3111, jako badania stanowiące tło dla powyższych badań podstawowych.

Realizowane badania dotyczyły zakładkowych połączeń klejonych w następujących zestawieniach:

- stal — stal, klej metakrylowy Plexus MA300,
- stal — stop aluminium, klej metakrylowy Plexus MA300,
- stal — tworzywo polimerowe ABS, klej metakrylowy Plexus MA300,
- stop aluminium — tworzywo polimerowe ABS, klej metakrylowy Plexus MA300,
- stop aluminium — stop aluminium, klej metakrylowy Plexus MA300,
- tworzywo polimerowe ABS — tworzywo polimerowe ABS, klej metakrylowy Plexus MA300.

Badania w warunkach obciążeń zmiennych obejmowały badania kleju metakrylowego Plexus MA300 oraz badania zakładkowych połączeń klejonych dla skojarzeń:

- stal — stal, klej metakrylowy Plexus MA300,
- stal — stop aluminium, klej metakrylowy Plexus MA300,
- stop aluminium — stop aluminium, klej metakrylowy Plexus MA300.

Kolejny etap badań doświadczalnych obejmował wyznaczenie kilkoma metodami analitycznymi rozkładów naprężeń stycznych w warunkach obciążeń statycznych zakładkowych połączeń klejonych.

Dalej w rozprawie przedstawiono wyniki badań zmęczeniowych wybranego kleju i wykonanych połączeń. W końcowej części pracy opisano metody wyznaczania rozkładów naprężeń i odkształceń w zakładkowych połączeniach klejonych. Przedstawiono wyniki obliczeń MES dla obciążeń niszczących oraz dla obciążeń odpowiadających wybranym poziomom trwałości.

Pozytywnie oceniam ten obszerny zakres pracy. Mogę jedynie dodatkowo wskazać na potrzebę pełniejszego badania stref destrukcji próbek z materiału klejącego, gdyż obrazy makroskopowe, lub obrazy uzyskane dla niewielkich powiększeń, nie pozwalają na dokładniejszą ocenę struktury geometrycznej powierzchni tej strefy.

Podobną sugestię można sformułować w odniesieniu do przełomów w wyniku uszkodzenia kohezyjnego połączenia klejowego. Istnieje ponadto problem skali w ocenie cech klejów, dokonywanej z wykorzystaniem próbek, o znacznie większej grubości od grubości warstw kleju między łączonymi elementami.

Można również przypuszczać, że odrębne badania topografii cienkich warstw kleju na badanych podłożach mogłyby wskazać, czy warstwy te są ciągłe i nie zawierają lokalnych niejednorodności.

Wysoko oceniam wnioski dotyczące dalszych badań (str. 131), zwłaszcza potrzebę badań prowadzonych dla zmiennych warunków otoczenia, na przykład dotyczące wpływu

temperatury oraz badania dotyczące zróżnicowania właściwości w cienkiej warstwie kleju między łączonymi elementami.

Na pozytywną ocenę zasługuje również ważny wniosek, iż badania trwałości w warunkach cyklicznego rozciągania próbek, nie tworzą jeszcze podstaw do prognozowania w warunkach zmiennego obciążenia.

Przyjęty zakres pracy doktorskiej oceniam jako ważny dla rozwoju wiedzy i zastosowań połączeń klejonych w nowoczesnych układach konstrukcyjnych eksploatowanych w warunkach zmiennych obciążeń.

Doktorant uwzględnił, iż w opisanych zakresach zastosowań szczególnego znaczenia nabierają wymagania dotyczące niezawodności i przewidywalności działania układów, których naprawy są utrudnione lub niemożliwe.

Ze względu na znaczenie nowych wyników, będących podstawą rozwoju wiedzy w zakresie wytrzymałości i trwałości zmęczeniowej połączeń klejonych, coraz szerzej stosowanych w różnorodnych układach technicznych, można stwierdzić, iż oceniana praca wyróżnia się zakresem badań, starannością opracowania wyników oraz ich przydatnością w zastosowaniach przemysłowych.

Realizacja pracy nie była łatwa ze względu na pracochłonne badania wytrzymałości i trwałości zmęczeniowej. Jej opracowanie jest ważnym elementem doskonalenia tej technologii wytwarzania połączeń klejonych.

Rozprawa jest kompletna, zawiera poprawne podsumowanie stanu wiedzy i jasne przedstawienie osiągnięć Autora. W spisie literatury znajduję liczne publikacje i opisy wynalazków Autora rozprawy, co dobrze świadczy o Jego dorobku i znaczeniu rozpatrywanych problemów.

2. Ocena poziomu naukowego i osiągnięć rozprawy

Recenzowana praca doktorska rozwiązuje wybrane problemy dotyczące tworzenia podstaw modelowania i obliczeń wytrzymałości oraz trwałości zmęczeniowej połączeń klejonych, a także ich zastosowań. Jej wyniki wnoszą nowe elementy do wiedzy w tym zakresie.

Do najważniejszych osiągnięć naukowych Autora zaliczam:

- 1. Doświadczalną weryfikację trwałości zmęczeniowej połączeń zakładkowych wykonanych z materiałów o różnych właściwościach mechanicznych** połączonych za pomocą kleju metakrylowego Plexus MA300, z której wynika wiele ważnych wniosków, w tym następujące:
 - obserwuje się znaczne różnice w trwałości zmęczeniowej dla badanych typów próbek, będące skutkami lokalnych zmienności warunków tworzenia się połączenia i zróżnicowania cech w kolejnych operacjach tworzenia połączeń,

- dla wymaganej trwałości powyżej $5 \cdot 10^6$ cykli dla połączeń zakładkowych Autor wykazał, że występują zbliżone wartości maksymalnych naprężeń stycznych, co wskazuje na brak wpływu sztywności łączonych na wytrzymałość zmęczeniową elementów (Autor sztywność odnosi do materiałów (str.128), co jest ograniczeniem znaczenia tego pojęcia),
 - praktycznym znaczeniem powyższego stwierdzenia jest możliwość określania jednej wartości naprężeń dopuszczalnych dla badanych typów połączeń zakładkowych w procesie ich projektowania, mimo tego, że dla mniejszej liczby cykli ze wzrostem sztywności łączonych elementów, można przyjmować większe naprężenia dopuszczalne,
 - wartości maksymalnych naprężeń stycznych dla liczby cykli z zakresu 10^4 do 10^6 wykazują różnice wynikające ze współczynnika kierunkowego prostych opisujących wyniki trwałości zmęczeniowej dla określonych typów próbek zakładkowych,
 - maksymalne naprężenia styczne dla liczby cykli z zakresu od $2,5 \cdot 10^6$ do $5 \cdot 10^6$ cykli badanych typów połączeń zawierają się w zakresie od 4,3 - 4,6 MPa.
2. **Badania trwałości zmęczeniowej kleju metakrylowego Plexus MA300**, z których wynikają następujące wnioski:
- charakterystyczne jest znaczne rozproszenie wartości trwałości zmęczeniowej,
 - pełzanie oraz tłumienie, powodujące rozpraszanie energii, o czym można wnioskować między innymi na podstawie zmian pętli histerezy, można zaliczyć do zjawisk typowych w procesach obciążenia materiałów klejących.
3. **Określenie kryteriów zniszczenia zakładkowych połączeń klejonych** z użyciem kleju metakrylowego:
- dla obciążeń statycznych i dla wysokich poziomów obciążeń zmiennych, uzasadnione jest przyjęcie, jako kryterium maksymalnego odkształcenia w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku rozciągania,
 - dla połączeń o wymaganej trwałości powyżej $5 \cdot 10^6$ cykli, jako kryterium należy wykorzystywać wartość maksymalnych naprężeń stycznych.
4. **Wykazanie, że wytrzymałość połączeń zakładkowych zależy głównie od mechanizmu uszkodzenia połączenia.** Największą wytrzymałość połączeń uzyskuje się dla kohezyjnego przełomu przez warstwę kleju. Przełom adhezyjny dla kleju metakrylowego w badanych typach połączeń należy uznać za błąd przygotowania powierzchni lub procesu klejenia.
5. **Wykazanie, że trwałość zmęczeniowa zakładkowych połączeń klejonych dla wyższych poziomów obciążeń (powyżej $\tau_{\max,i} = 5$ MPa) zależy od sztywności łączonych elementów.** Dla niższych poziomów obciążeń, wpływ sztywności połączenia znacząco maleje.

6. **Udowodnienie, że analiza rozkładów naprężeń stycznych wyznaczonych metodami analitycznymi (metodą inżynierską, metodą Volkersena, metodą Gollanda-Raisnera, metodą Adamsa-Pepiatta) w zakładkowych połączeniach klejonych nie pozwala na szacowanie ich wytrzymałości dla wyższych poziomów obciążeń.** Wynika to z faktu, iż metody te nie uwzględniają powstawania stref plastycznych i wyrównywania naprężeń w warstwie kleju.
7. **Stwierdzenie na podstawie analizy rozkładów naprężeń i odkształceń, wyznaczonych metodą elementów skończonych, w zakładkowych połączeniach klejonych, że największe naprężenia występują na granicy klej - element łączony.**
8. **Wykazanie, że dla obciążeń niszczących z prób statycznych obserwuje się wyrównanie naprężeń i uplastycznienie kleju.** Zasięg stref plastycznych, określany od końców zakładki, zależy od sztywności łączonych elementów. Potwierdza to analiza przełomów. Dla połączeń o wysokiej sztywności łączonych elementów cały przekrój warstwy kleju ulega uplastycznieniu. Dla połączeń o znacznej podatności łączonych elementów, uplastyczniona strefa warstwy kleju występuje tylko w pobliżu końców zakładki.

Prace badawcze Doktoranta zaowocowały wynalazkami zgłoszonymi do Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej. Były nimi trzy rozwiązania konstrukcyjne usprawniające proces wytwarzania i badania próbek połączeń klejonych. Uzyskano jeden patent, a dwa zgłoszenia patentowe są rozpatrywane.

4. Wniosek końcowy

W wyniku analizy rozprawy mgr inż. Pawła Maćkowiaka nt.: „**Analiza wytrzymałości i trwałości zmęczeniowej zakładkowych połączeń klejonych wykonanych z materiałów o różnych właściwościach mechanicznych**”, której promotorem jest dr hab. inż. Bogdan Ligaj, mogę stwierdzić, iż Autor:

- Wybrał temat i zakres pracy doktorskiej ważny dla rozwoju wiedzy i zastosowań połączeń klejonych w inżynierii mechanicznej i w innych dziedzinach nauk technicznych.
- Opracował podstawy wyznaczania wytrzymałości i trwałości zmęczeniowej takich połączeń. Udowodnił, że analiza rozkładów naprężeń stycznych, wyznaczonych metodami analitycznymi, nie pozwala na szacowanie ich wytrzymałości na wyższych poziomach obciążeń, gdyż metody te nie uwzględniają powstawania stref plastycznych i wyrównywania naprężeń w warstwie kleju.
- Przyjął wystarczająco szeroki zakres problemów rozpatrywanych w rozprawie. Dzięki temu zostały określone podstawy doskonalenia procesów projektowania i operacji wytwarzania badanych połączeń.

- Poprawnie określił kierunki dalszych badań i sformułował ważne problemy badawcze, w tym dotyczące badań w warunkach zmiennych obciążeń i zróżnicowanych oddziaływań otoczenia, których rozwiązanie prowadzić będzie do kolejnych prac naukowych oraz nowych zastosowań.
- Praca doktorska mgr inż. Pawła Maćkowiaka została bardzo starannie opracowana i zredagowana. Zawiera wartościowe wyniki, które mogą być wykorzystane w innych pracach badawczych, a doktorant korzystnie zaprezentował swoje umiejętności naukowe.

Stwierdzenia powyższe uzasadniają opinię, iż rozprawa w bardzo dobrym stopniu spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim. Wnoszę o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony. Na podstawie powyższej oceny formułuję wniosek o wyróżnienie pracy.

