

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Mateusza Wygody: „Wytrzymałość zmęczeniowa płaskich elementów konstrukcji z otworami, wzmacnianych nakładkami kompozytowymi”

Promotor: dr hab. inż. Bogdan Szybiński, prof. PK

Promotor pomocniczy: dr inż. Paweł Romanowicz

1. Podstawy formalne i ogólna charakterystyka rozprawy

Recenzję wykonano na zlecenie Rady Naukowej Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej, wyrażone w piśmie M.00-60/2023 z dnia 28 marca 2023 roku, które podpisał Prodziekan Wydziału Mechanicznego PK prof. dr hab. inż. Marek S. Kozień.

2. Informacja o ocenianej rozprawie doktorskiej

2.1. Tytuł rozprawy, ocena układu treści, zakresu i struktury rozprawy

Analizowana rozprawa doktorska mgr inż. Mateusza Wygody: „Wytrzymałość zmęczeniowa płaskich elementów konstrukcji z otworami, wzmacnianych nakładkami kompozytowymi” została napisana na 133 stronach maszynopisu i zawiera:

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń

1. Wprowadzenie, jako rozdział 1
2. Rozdział 2: Materiały i metody badawcze
3. Rozdział 3: Zmęczeniowa trwałość połączeń klejowych
4. Rozdział 4. Wpływ wzmocnienia na trwałość elementów konstrukcji z otworami
5. Rozdział 5. Wpływ rodzaju spoiwa na trwałość zmęczeniową
6. Rozdział 6. Podsumowanie i wnioski końcowe

Literatura

Streszczenia

Zestawienie rysunków

Zestawienie tabel.

Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Bogdan Szybiński, prof. PK, promotorem pomocniczym dr inż. Paweł Romanowicz.

Struktura rozprawy jest typowa dla prac naukowo-badawczych. Po zdefiniowaniu problemu i tytułu rozprawy, to zawarto we wprowadzeniu, Doktorant przeprowadza analizę stanu wiedzy, następnie formułuje cel pracy, definiuje materiały i metody badawcze, przeprowadza zaplanowany eksperyment badawczy, który następnie analizuje, formułuje wnioski i podsumowuje rozprawę. Charakterystyczną cechą analizowanej rozprawy jest brak jasno zdefiniowanych hipotez badawczych, Doktorant zastępuje je celem badań. Częściowo zapewne wynika to z faktu, że przyjęty główny cel badań, jest nim wykazanie korzystnego wpływu zastosowania kompozytowych nakładek wzmacniających konstrukcję z karbem, w postaci otworu kwadratowego z zaokrąglonymi narożami, na trwałość zmęczeniową konstrukcji, nosi pewne cechy oczywistości i pozwala apriorycznie przypuszczać, że ten wpływ będzie pozytywny. Układ jest logiczny, kolejne etapy rozprawy są naturalnym następstwem postępu w badaniach. Rozprawa posiada wymagane prawem streszczenie w języku angielskim. Z formalnego punktu widzenia rozprawa spełnia kryteria prawne.

2.2. Ocena celu rozprawy oraz zastosowanych metod pracy badawczej

Rozprawa doktorska, z założenia powinna stanowić dowód uzyskania przez Doktoranta umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych. Jeśli przyjmiemy takie założenia, to Doktorant powinien wykazać odpowiedni do standardów doktorskich poziom wiedzy z dyscypliny w której ubiega się o stopień doktora, umieć zdefiniować problem badawczy na tle stanu wiedzy, zaplanować eksperyment, wykonać eksperyment z wykorzystaniem nowoczesnych narzędzi do badań oraz przeprowadzić na odpowiednim poziomie dyskusję wyników z wykorzystaniem naukowych metod teorii wnioskowania. Doktorant jasno precyzuje cel badań. Do realizacji tego celu wykorzystuje badania niszczące, analizę MES oraz komputerową analizę obrazu do analizy przemieszczeń. Analizy przełomów dokonuje metodą wizualną, dla jakościowej oceny może to być dopuszczalne. Celem rozprawy jest wykonanie takiego cyklu badawczego, który w efekcie pozwoli na stwierdzenie, że zastosowanie nakładek kompozytowych na element stalowy z karbem powoduje wzrost trwałości zmęczeniowej takiego elementu. Do osiągnięcia tego celu zastosowany zakres badań jest wystarczający.

Dobrze oceniam logikę badawczą Doktoranta. Kolejność procesu badawczego, następstwo badań jako efekt wniosków z badań poprzedzających, zasługują na uznanie. Nie wnoszę uwag do tytułu rozprawy.

2.3. Ocena wykorzystanego piśmiennictwa oraz opisu stanu wiedzy

Analizowana literatura obejmuje 141 pozycji w językach polskim, angielskim, niemieckim, rosyjskim. Jest to literatura bardzo zróżnicowana. Są tam zarówno ponad 50

letnie podręczniki jak też artykuły naukowe z ostatnich kilku lat, są także artykuły, np. jedna z fundamentalnych dla połączeń klejowych praca Volkersena z 1938 roku w języku niemieckim, chyba w oryginale jest dość trudno dostępna. Przegląd literatury jest nadzwyczaj syntetyczny, obejmuje pkt. 1.2 (str. 13-18) rozprawy doktorskiej. Wprawdzie Autor odsyła także czytelnika do niektórych pozycji również w innych rozdziałach, ale pewien niedosyt budzi brak podsumowania stanu wiedzy w kontekście celów rozprawy, zwłaszcza osobistej oceny Doktoranta, przede wszystkim krytycznej refleksji na temat tego stanu. To znakomicie ułatwia formułowanie hipotez badawczych i definiowania celów oraz zakresu rozprawy.

3. Ocena uzyskanych wyników badań oraz poziomu ich naukowej dyskusji

Zaplanowanie i przeprowadzenie zaplanowanego programu badań pozwoliło Doktorantowi na uzyskanie wyników, dość znaczących, zarówno w obszarze poznawczym jak i praktycznym. Ważniejsze efekty uzyskane przez Doktoranta są następujące:

- A. Zaplanowanie i przeprowadzenie oryginalnego programu badań zmęczeniowych, polegającego na zastosowaniu bardzo wysokiego poziomu, zbliżonego do granicy plastyczności, obciążenia cyklicznego. To pozwoliło, w efekcie zwiększenia odkształcenia rdzenia, uzyskać wyniki wskazujące na wpływ kleju i nakładki na trwałość zmęczeniową.
- B. Wykazanie wpływu zastosowania nakładek na efekt wzmocnienia, choć słabą stroną tej analizy jest brak jakiegokolwiek próby uogólnienia wyników, na przykład wielkość pola powierzchni sklejenia w kontekście cech geometrycznych karbu.
- C. Zaplanowanie i przeprowadzenie interesującej analizy odkształcenia strefy połączenia z wykorzystaniem technik wizyjnych. Pozwoliło to na analizę odkształcenia nakładek wzmacniających, może to być wykorzystane jako wskazówka do doboru rozmiarów nakładek wzmacniających, nie zostało to jednak wystarczająco przeanalizowane przez Doktoranta.
- D. Wykazanie wpływu cech fizycznych kleju w stanie utwardzonym na efekty wzmocnienia, choć w jakościowej ocenie jest powszechnie znane, że w warunkach obciążeń zmęczeniowych znacznie lepiej radzą sobie kleje o relatywnie zwiększonej elastyczności. Stosowany w badaniach klej S&PResin 220 Epoxy Adhesive, z modułem Younga $E = 7,1 \text{ GPa}$, jest raczej tzw. kitem konstrukcyjnym i nie nadaje się do łączenia elementów eksploatowanych w warunkach obciążeń zmęczeniowych.

Należy podkreślić, że w każdym obszarze badań niezbędnych do uzyskania efektów przedstawionych w pkt A-D, Doktorant wykazał się kompetencjami, a dyskusja wyników jest

na dobrym poziomie. Z punktu widzenia wymienionych wcześniej warunków prawnych stwierdzam, że są one spełnione na dość dobrym poziomie.

4. Uwagi do ocenianej rozprawy

4.1. Uwagi i sugestie dotyczące otrzymanych rezultatów

Niektóre elementy dotyczące aspektów metodycznych jak też merytorycznych związanych z interpretacją otrzymanych wyników, nasuwają jednak pewne uwagi:

- A. Mam pewne zastrzeżenia do jakości wykonanych połączeń. Na rysunkach przedstawiających złomy próbek widoczne są wypłytki na krawędziach bocznych i końcach nakładek. Może to być przyczyną znacznego rozrzutu wyników. Pewnym problemem jest niewielka liczba powtórzeń, czasem nawet tylko jedna próbka. Rozumiem specyfikę badań zmęczeniowych, ale nie ulega wątpliwości, że uzyskane wyniki ilościowe mogłyby być nieco inne po wykonaniu odpowiedniej liczby powtórzeń.
- B. Doktorant nie uzasadnia przyjętych cech geometrycznych, zarówno karbu, rdzenia jak i stosowanych nakładek. Z analizy odkształcenia nakładek (pasów kompozytowych) wynika, że ich długość przekracza uzasadnioną wartość. Ta dowolność przyjętych cech geometrycznych analizowanej struktury sprawia, że uzyskanych wyników nie można ekstrapolować na inne cechy geometryczne połączenia. Można tylko stwierdzić, że w niektórych przypadkach uzyskano bardzo widoczny efekt wzmocnienia.
- C. Efekty klejenia są ściśle skorelowane z technologią. Doktorant nie precyzuje warunków obróbki papierem ściernym o granulacji 100 (docisk, czas obróbki, kierunek posuwu), rodzaj stosowanego czysciwa, poziom docisku nakładek w procesie utwardzania, temperatura utwardzania, warunki otoczenia (wilgotność, temperatura) w jakich wykonywano połączenia. To ważne dla standardów badań naukowych, także w aspekcie samego opisu badań i celu w jakim te opisy są wykonywane. Ktoś, kto chciałby powtórzyć badania Doktoranta, nie będzie w stanie tego zrobić.
- D. Wątpliwości budzą zastosowane przez Doktoranta grubości warstwy kleju. Zawierają się one w granicach (0,3 – 1,5) mm. Nie jest to typowe dla połączeń klejowych. Z reguły przyjmuje się, że grubość warstwy kleju, w połączeniach tzw. konstrukcyjnych, czyli przenoszących obciążenia w eksploatacji, nie powinna przekraczać 0,5 mm. Wyższe wartości grubości warstwy kleju stosowane są w hermetyzacji konstrukcji i regeneracji. W typowych połączeniach klejowych metali i kompozytów polimerowych grubość warstwy kleju z reguły nie przekracza 0,1 mm.

Ma to swój wpływ na uzyskane wyniki. Przy tak znacznych grubościach warstwy kleju jakie stosowano w badaniach i tych wartościach odkształcenia rdzenia, to przede wszystkim klej podlega odkształceniom, nakładka w znacznie mniejszym stopniu. Potwierdzają to także uzyskane złomy.

- E. Przy stosowanych grubościach warstwy kleju uproszczeniem jest założenie równości naprężeń w spoinie klejowej w jej przekroju poprzecznym do powierzchni sklejenia. Należy liczyć się z wpływem pozornego modułu Younga na właściwości skleiny w strefie przyściennej, zwłaszcza w strefie rdzenia, ryzykowne jest także założenie liniowej lepkosprężystości w analizie MES przy takiej grubości warstwy kleju.
- F. Doktorant nie podaje przy jakiej częstotliwości prowadzono badania zmęczeniowe. Przy wyższych częstotliwościach w utwardzonych tworzywach polimerowych może wystąpić zjawisko temperatury samowzbudnej, w istotny sposób może to wpłynąć na wyniki.
- G. Należy unikać umieszczania w rozprawie naukowej równań aproksymujących uzyskane wyniki w postaci rozkodowanej (np. rys. 3.13). Nie jest to równanie zgodne wymiarowo.

4.2. Uwagi redakcyjne

Rozprawa, w ocenie ogólnej napisana jest dość starannie, bardzo mało występuje tzw. „literówek”, pomijam je jako nieistotne dla wartości rozprawy, zdania są logiczne, Doktorant stosuje poprawną terminologię techniczną. Na niektóre jednak usterki, zgodnie z zasadami oceny rozpraw doktorskich, zwracam uwagę:

- Doktorant używa określenia „w takim wypadku”, należy raczej napisać „w takim przypadku”, (str. 10, 21)
- stal S355J2 + N jest stalą niskostopową, a nie niestopową (str. 21),
- Doktorant czasem zamiennie używa określenia „zakładka” i „nakładka” (np. str. 33), to zupełnie inne pojęcia,
- na str. 33 powtórzono fragment treści „Brak zrównoważonej sztywności.....”,
- str. 77 jest „na wskutek”, powinno być „na skutek” lub „wskutek”.

5. Ocena osiągnięć Doktoranta w aspekcie wymagań prawnych

Biorąc pod uwagę ocenę rozprawy w kontekście spełniania wymagań prawnych regulujących tryb i warunki przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora, należy stwierdzić, że Doktorant spełnił te wymagania poprzez:

1. Doktorant przeprowadził na dość dobrym poziomie, w aspekcie wymagań prawnych, rozwiązanie problemu naukowo-technicznego, o charakterze analityczno-eksperymentalnym, poprzez autorskie opracowanie i przeprowadzenie badań statycznych i zmęczeniowych konstrukcji osłabionej karbem i wzmacnianej nakładkami o określonych cechach geometrycznych.
2. Doktorant wykazał się adekwatną do standardów przewodu doktorskiego wiedzą ogólną i szczegółową, odpowiadającą specyfice dyscypliny w której ubiega się o stopień doktora. Wiedza ta zawarta jest częściowo w analizie literatury opartej o 141 pozycji, dość dobrze skorelowanych z merytoryczną istotą rozprawy, kompetentnie cytowanych źródeł, także w ocenie i interpretacji uzyskanych wyników, logice wywodów i formułowaniu poprawnych wniosków.
3. Doktorant wykazał, że potrafi samodzielnie formułować zadania badawcze, logicznie zaplanować eksperyment, wykorzystywać nowoczesną aparaturę do badań naukowych oraz rozwiązywać złożone problemy kształtowania wytrzymałości konstrukcji.

W efekcie całościowego spojrzenia na ocenianą rozprawę doktorską uważam, że stanowi ona interesujące opracowanie o charakterze naukowym i aplikacyjnym, wzbogaca wiedzę Doktoranta w ważnym obszarze inżynierii mechanicznej, jest też dowodem na osiągnięcie przez Doktoranta nie tylko wiedzy ale i ważnej w badaniach intuicji naukowej.

6. Wniosek końcowy

Przeprowadzone prace studialne, analiza teoretyczna, i przeprowadzone, według własnych koncepcji, badania eksperymentalne, w odczuciu opiniującego stanowią zamkniętą i logiczną część ważnej problematyki w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Uważam, że wykonanie tej pracy wzbogaca wiedzę Doktoranta o złożonych zjawiskach w procesie konstrukcji i technologii kształtowania interesujących połączeń klejowych, zwłaszcza w kontekście ich trwałości zmęczeniowej.

Analizowana rozprawa doktorska, w przekonaniu opiniującego, w dość dobrym stopniu spełnia wymagania prawne w sprawie wymagań i trybu przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich i wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Mateusza Wygody do jej publicznej obrony w dyscyplinie *inżynieria mechaniczna*.

