

Recenzja

Rozprawy doktorskiej mgr. inż. Andrzeja KUBITA

pt. *"Determinanty wytrzymałości połączeń klejowych na oddzieranie"*

1. Uwagi ogólne

Intensywne prace badawcze w obszarze połączeń klejowych trwają nieprzerwanie od kilkudziesięciu lat. Liczba ośrodków badawczych, które zajmują się tego rodzaju połączeniami oraz liczba publikacji dotycząca problematyki klejów konstrukcyjnych i połączeń klejowych jest potwierdzeniem faktu, że ten sposób łączenia materiałów ma wciąż duży potencjał aplikacyjny i w przyszłości tego rodzaju połączenia będą w dalszym ciągu z powodzeniem stosowane przez konstruktorów.

Zainteresowanie problematyką połączeń klejowych jest również naturalną konsekwencją coraz szerszego stosowania w budowie maszyn, szczególnie w przemyśle lotniczym, polimerowych kompozytów warstwowych jako materiałów konstrukcyjnych. Zagadnienia dotyczące tego rodzaju materiałów kompozytowych są w szerokim zakresie zbieżne z problematyką połączeń klejowych.

Istotnym obszarem badawczym połączeń klejowych są zagadnienia dotyczące ich wytrzymałości. Połączenia klejowe powinny być projektowane w taki sposób, aby w ich spoinach dominowały naprężenia ścinające, co nie oznacza że w złożonych stanach obciążenia nie występują w spoinach również dodatnie naprężenia normalne powodujące inicjację zniszczenia w stanie oddzierania. W związku z powyższym podjęcie przez Doktoranta badań z zakresu wytrzymałości połączeń klejowych na oddzieranie należy uznać za działanie zasadne i zgodne ze najnowszymi trendami.

2. Charakterystyka rozprawy

Rozprawa ma charakter pracy eksperymentalno - obliczeniowej, której podstawowym celem była ocena wpływu zmian konstrukcyjnych klejonych elementów w strefie przykrawędziowej połączenia na wytrzymałość statyczną i zmęczeniową połączeń obciążonych na oddzieranie oraz poszukiwanie zależności pomiędzy fizyczną

modyfikacją klejów konstrukcyjnych poprzez dodawanie nanonapełniaczy a wytrzymałością doraźną i zmęczeniową połączeń klejowych.

Pozytywny wpływ zmian konstrukcyjnych w końcowej strefie zakładki połączenia na ich wytrzymałość jest znany od lat i szeroko opisywany w literaturze, na którą również powołuje się Doktorant, z tym że większość badań dotyczy połączeń obciążonych na ścinanie. Praca Doktoranta jest istotnym uzupełnieniem tego obszaru badawczego w zakresie badań połączeń obciążonych na oddzieranie. Problematyka modyfikowania fizycznego klejów konstrukcyjnych jako metody poprawy ich właściwości wytrzymałościowych i użytkowych, a przez to również właściwości samych połączeń jest również od dawna przedmiotem badań wielu ośrodków. Z tym, że Autor w swoich eksperymentach wykorzystuje struktury węgla oraz materiały ceramiczne wytwarzane w skali nano. Mechanizmy odpowiedzialne za zmianę właściwości tworzyw sztucznych, w tym również tworzyw adhezyjnych, w wyniku ich modyfikacji nanocząstkami są obecnie dopiero rozpoznawane. W związku z tym należy docenić pionierskie wysiłki Doktoranta, których celem była analiza wpływu tego rodzaju napełniaczy na parametry wytrzymałościowe i użytkowe samych klejów i połączeń klejowych.

W trakcie realizacji pracy badaniom poddawano połączenia wykonywane ze stali 235JR i trzech kompozycji klejowych różniące się parametrami wytrzymałościowymi, które dodatkowo na potrzeby realizacji badań modyfikowano fizycznie. W testach eksperymentalnych stosowano najnowsze urządzenia badawcze i techniki pomiarowe, m.in. oparte na cyfrowej korelacji obrazu, natomiast w obliczeniach najnowsze narzędzia oparte na metodzie elementów skończonych. Pozyskanie i pogłębienie wiedzy w tych obszarach, w przypadku młodego naukowca rozpoczynającego swoją karierę naukową, ma istotne znaczenie w jego dalszych działaniach badawczych. Wyniki badań eksperymentalnych były konfrontowane z rezultatami obliczeń analitycznych i numerycznych i stanowiły podstawę do przeprowadzenia merytorycznej dyskusji.

Praca składa się z 8 rozdziałów zawartych na 154-ch stronach maszynopisu z wyodrębnieniem Wprowadzenia i Bibliografii zawierającej 148 pozycje.

Rozdziały stanowią ciąg logiczny, a najważniejszymi z nich, to:

- **rozdział pierwszy**, w wyniku realizacji którego m.in. zdefiniowano hipotezę badawczą oraz cele pracy. Przegląd literatury zawarty w tym rozdziale jest aktualny i reprezentatywny dla problematyki tematu a liczba pozycji spełnia standardy rozpraw

doktorskich;

- **rozdział trzeci**, w którym m.in. scharakteryzowano elementy typu cohesive wykorzystywane w obliczeniach numerycznych, przedstawiono techniki badawcze stosowane w pracy oraz metodyki realizacji badań eksperymentalnych, w tym, autorską metodę pomiaru przemieszczeń w strefie przykrawędziowej połączenia za pomocą analizy obrazu mikroskopowego. W rozdziale zaprezentowano również metodykę wykonania badań zmęczeniowych oraz sposób mieszania mechaniczno-ultradźwiękowego nanonapełniaczy z żywicą, w celu ograniczenia negatywnego zjawiska aglomeracji nanocząstek;

rozdział czwarty, który poświęcony jest wyznaczeniu rozkładu naprężeń normalnych w spoinie połączenia obciążonego na oddzieranie. Wartości naprężeń obliczonych ze znanych zależności analitycznych porównano z wynikami obliczeń numerycznych oraz danymi eksperymentalnymi. Pomimo tego, że paraboliczny rozkład naprężeń otrzymany w wyniku realizacji procedury eksperymentalno-obliczeniowej zaprezentowany na rys. 4.7 wydaje się mało prawdopodobny to należy docenić wysiłki Doktoranta związane z pracochłonnym przygotowaniem pomiarów tensometrycznych, realizacją samych badań oraz krytyczną dyskusją otrzymanych wyników. Na uwagę zasługują również rezultaty pomiarów wizyjnych, chociaż z lektury rozdziału nie wynika jednoznacznie w jakim zakresie wyniki tych pomiarów (w metodzie korelacji obrazu i autorskiej metodzie mikroskopowej) posłużyły do „budowy w pełni rzetelnego modelu numerycznego próbki złącza klejowego”.

rozdział piąty, zawierający wyniki obliczeń analitycznych i numerycznych połączenia klejowego obciążonego na oddzieranie z modyfikowanym konstrukcyjnie elementem. Zgodnie z przewidywaniami Autora, które potwierdził stosownymi obliczeniami, zwiększenie grubości spoiny klejowej w strefie spiętrzenia naprężeń, spowodowało istotne zmniejszenie wartości naprężeń normalnych w tym newralgicznym obszarze spoiny. Wykonane badania eksperymentalne potwierdziły pozytywny wpływ zaproponowanych zmian konstrukcyjnych na nośność badanych połączeń. W tym miejscu dyskusyjne wydają się jednoznaczne stwierdzenia o istotnych zmianach nośności połączeń formułowane na podstawie analizy porównawczej ich wartości średniej bez uwzględnienia rozrzutu wyników badań.

rozdział szósty, w którym na podstawie wyników badań eksperymentalnych zaprezentowano ilościowe zmiany nośności połączeń przygotowanych na bazie klejów modyfikowanych nanonapełniaczami. Kilkunastoprocentowy wzrost nośności zależał

nie tylko od rodzaju i ilości napelnacza, ale również od podatności żywicy na procesy rozpraszania cząstek, co jak zauważył Doktorant ma bezpośredni związek z lepkością kompozycji klejowej. Pozytywne zmiany w nośności połączeń mogą być, zgodnie z sugestiami Autora, naturalną konsekwencją spadku wartości swobodnej energii powierzchniowej utwardzonego kleju modyfikowanego fizycznie nanocząstami. Wnioski płynące z tego rozdziału mają istotne znaczenie nie tylko w obszarze konstruowania połączeń klejowych, ale również w zakresie technologii wytwarzania modyfikowanych kompozytów klejowych.

rozdział siódmy, w którym zaprezentowano wyniki pracochłonnych badań zmęczeniowych połączeń. W sposób eksperymentalny udowodniono, że zarówno zmiany konstrukcyjne łączonych elementów oraz modyfikacja fizyczna kleju mają pozytywny wpływ nie tylko na nośność połączeń, ale również na ich wytrzymałość i trwałość zmęczeniową. Należy tylko żałować, że Doktorant nie zamknął tego cyklu badań próbami, z połączeniami przygotowanymi na bazie własnej modyfikowanej kompozycji klejowej z jednocześnie „ulepszonymi” konstrukcyjnie klejowymi elementami (np. dla tzw. wariantu R2).

Wyniki uzyskane w ramach wykonanej pracy potwierdzają jej charakter, zarówno aplikacyjny jak i poznawczy. Na podkreślenie zasługuje fakt szerokiego wykorzystania przez Doktoranta nowoczesnych przyrządów pomiarowych i narzędzi obliczeniowych, staranność realizacji badań eksperymentalnych oraz umiejętności prowadzenia analiz opartych na wynikach obliczeń i właściwie zaplanowanych badań eksperymentalnych.

Nowatorskim osiągnięciem Doktoranta jest m.in.:

- zaproponowanie autorskiej metodyki wyznaczania wartości przemieszczeń spoiny klejowej na podstawie analizy obrazu mikroskopowego;
- wykazanie pozytywnego wpływu nanocząstek dodawanych do klejów konstrukcyjnych na nośność oraz wytrzymałość i trwałość zmęczeniową połączeń klejowych obciążonych na oddzieranie;
- osiągnięcie wartościowych wyników w badaniach porównawczych połączeń z elementami modyfikowanymi konstrukcyjnie;
- zdefiniowanie technologicznych zaleceń dotyczących warunków mieszania nanocząstek z klejami wytwarzanymi na bazie żywic epoksydowych.

Z lektury pracy wynikają także pewne uwagi do skomentowania których proszę Doktoranta w ramach odpowiedzi na recenzję:

1. Z czego mogą wynikać tak istotne różnice w wartościach naprężeń normalnych obliczone MES wzdłuż szerokości przy tzw. czole spoiny w analizowanym połączeniu „odczytane” w osi symetrii spoiny i wzdłuż bocznej krawędzi spoiny (np. rys. 4.24, rys. 5.8, rys. 5.10)?
2. Proszę bardziej szczegółowo wyjaśnić na czym polegała „weryfikacja” modelu numerycznego na bazie wyników wizyjnych badań eksperymentalnych. Czy może Autor opracowania porównywał wyznaczone eksperymentalnie przemieszczenia punktów pomiarowych z wartościami obliczonymi MES?
3. Czy w opinii Doktoranta jednoczesne zastosowanie modyfikowanego kleju i zmian konstrukcyjnych w łączonych elementach w jeszcze bardziej skuteczny sposób poprawi badane parametry wytrzymałościowe i użytkowe (nośność połączeń i trwałość zmęczeniową)?
4. Czy zgodnie z prezentowanym w pracy sposobem wykonywania modyfikowanej nanocząstkami kompozycji klejowej w ostatnim etapie jej przygotowania, po ostudzeniu żywicy i dodaniu utwardzacza, proces mieszania mechanicznego nie powodował zjawiska aglomeracji cząstek?
5. Czy w badaniach zmęczeniowych realizowanych z dużą częstotliwością generowanych wymuszeń nie występował problem nagrzewania się spoin połączeń?

Powyższe uwagi nie umniejszają wartości naukowej pracy, a mają jedynie być inspiracją do dyskusji naukowej i pogłębionej analizy uzyskanych wyników.

W płaszczyźnie edycyjnej rozprawa jest przygotowana bardzo starannie. Na szczególną uwagę zasługuje jej szata graficzna. Praca jest również napisana poprawnym językiem, pod względem stylistycznym i gramatycznym, myśli przekazywane są jasno, zwięźle i zrozumiale. Do nielicznych jej mankamentów redakcyjnych można zaliczyć niektóre sformułowania:

- Str. 5. – „w celu wykrzesania z nich możliwie dobrych właściwości adhezyjnych. Z kolei jeśli idzie o zagadnienie...”
- Str. 10 – „...coraz nowocześniejsze technologie potrafiące na tyle”
- Str. 12 – „...”naprężenia normalne do warstwy kleju przybierają bardziej znaczący wymiar”.
- Str. 100 – „model przedstawiony w rozdziale 4.4.4.” w pracy nie ma takiego rozdziału
- Tabele 7.6 – 7.17 – „Wartość średnia N ” – powinno być „Wartość średnia $N \times$

10³”.

Powyższe usterki redakcyjne nie zmieniają mojej zdecydowanie pozytywnej opinii o wykonanej pracy.

3. Uwagi końcowe

Stwierdzam, że postawiona hipoteza pracy zostały przez Autora potwierdzona, a założone cele zostały w pełni osiągnięte.

Doktorant w wyniku realizacji pracy uzyskał niezbędne doświadczenie badawcze i jest dobrze przygotowany do rozwiązywania złożonych problemów badawczych, a otrzymane wartościowe dane powinny stanowić solidną podstawę do dalszych badań w obszarze połączeń klejowych.

Na szczególne podkreślenie zasługuje także fakt właściwego wykorzystania aparatury badawczej i wysokie umiejętności w posługiwaniu się nowoczesnymi narzędziami analitycznymi opartymi na metodzie elementów skończonych.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że praca spełnia wymagania wynikające z Ustawy o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym z dnia 14 marca 2003 r. i wnioskuję o dopuszczenie Doktoranta do publicznej obrony przed Radą Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej.

