

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Kamila Anasiewicza nt.
„Pozorny moduł Younga w prognozowaniu wytrzymałości połączeń klejowych”

Niniejszą recenzję opracowano na zlecenie Z-cy Przewodniczącego Rady Dyscypliny
Inżynieria Mechaniczna Politechniki Lubelskiej
dra hab. inż. Jarosława Bieniasia, prof. PL
pismo nr RDN/IM/189/2024
z dnia 11 września 2024 r.

1. Ogólna, formalna charakterystyka pracy

Recenzowana rozprawa została przedstawiona na 175 stronach maszynopisu i zawiera poza spisem treści, streszczeniem w języku polskim i angielskim, wykazem ważniejszych oznaczeń, wstępem, spisem rysunków oraz spisem tabel:

- rozdział drugi, w którym Doktorant dokonał przeglądu literatury dotyczącej: charakterystyki połączeń klejowych, teorii ich konstytuowania, teorii adhezji, modelowania połączeń klejowych, charakterystyki modeli analitycznych rozkładu naprężeń w spoinie klejowej i zjawiska pozornego modułu Younga spoin klejowych;
- rozdział trzeci zawierający cele pracy i jej zakres oraz hipotezy badawcze;
- rozdział czwarty, w którym zaprezentowano metodykę badań dotyczącą testów nanoindentacyjnych, testów wytrzymałości połączeń klejowych oraz testów wyznaczania modułu Younga tworzywa klejowego. W rozdziale scharakteryzowano również warunki wykonania symulacji numerycznych oraz zdefiniowano liczebność próby w testach nanoindentacyjnych. W tej części pracy przedstawiono także materiały stosowane w badaniach eksperymentalnych i technologię wykonywania próbek do badań;
- rozdział piąty zawierający wyniki własnych badań eksperymentalnych dotyczących: modułu Younga tworzyw klejowych, wytrzymałości połączeń klejowych, analiz zniszczenia spoin klejowych, badań nanoindentacyjnych oraz wyniki symulacji numerycznych w zakresie rozkładu naprężeń w spoinach połączeń klejowych;

- rozdział szósty, w którym zaprezentowano wyniki analizy statystycznej uzyskanych wyników;

- podsumowanie i wnioski końcowe,
- wykaz cytowanej literatury, zawierający 143 pozycje.

2. Ocena tematu i zakresu pracy

W przedłożonej pracy Doktorant podjął się rozwiązywania zagadnienia związanego ze zjawiskiem występującym w spoinach połączeń klejowych a nazywanym w literaturze pozornym modułem Younga. Szczegółowa analiza zmian modułu Younga wzdłuż grubości spoiny klejowej wykonana metodą badań nanoindentacyjnych potwierdziła przypuszczenia definiowane na przestrzeni lat przez badaczy o istnieniu w spoinie klejowej strefy przyściennej z podwyższoną wartością modułu Younga. Uwzględnienie tego zjawiska pozwala w sposób bardziej dokładny prognozować wytrzymałość połączeń klejowych i uzyskiwać bardziej dokładne wyniki w symulowaniu numerycznym pola naprężeń spoiny klejowej. Ponieważ połączenia klejowe należą do rodzaju połączeń powierzchniowych, w których grubość spoiny klejowej wpływa w sposób istotny na parametry wytrzymałościowe połączenia, w pracy została przeprowadzona również skuteczna próba poszukiwania odpowiedzi na pytanie w jakim zakresie warstwa przyścienna wpływa na wytrzymałość doraźną połączeń ze spoiną umownie nazwaną „grubszą” (grubość 0,1 mm) i „cieńszą” (grubość 0,05 mm). Autor rozprawy swoje rozważania dotyczące zmian modułu Younga w spoinie klejowej rozszerzył również poddając analizie grupę klejów traktowanych, wg. kryterium wartości modułu Younga, jako tworzywa sztywne i elastyczne. Wysiłki związane z ilościowym zdefiniowaniem zmian modułu Younga wzdłuż grubości spoiny zostały bezpośrednio wykorzystane w symulacjach numerycznych połączenia dwunakładkowego. Na podstawie analizy porównawczej pomiędzy wynikami symulacji numerycznej a wynikami testów eksperymentalnych, po uwzględnieniu propozycji Doktoranta, potwierdzono większą dokładność obliczeń.

Problematyka prognozowania właściwości wytrzymałościowych konstrukcyjnych połączeń klejowych jest wciąż aktualna, mimo że same połączenia są używane w rozwiązaniach technicznych od kilkadziesiąt lat. Motywacją do zainteresowania badaczy tematyką poprawy parametrów wytrzymałościowych połączeń klejowych jest ciągły proces udoskonalania samych tworzyw adhezyjnych, ograniczanie niedoskonałości połączeń klejowych i coraz doskonalsza ich diagnostyka, ale również coraz lepsze rozpoznanie zjawisk, które towarzyszą procesowi klejenia. Nie bez znaczenia jest również wykorzystanie w budowie maszyn np. w przemyśle lotniczym czy kosmicznym, na coraz większą skalę polimerowych materiałów

kompozytowych, których syciwa oparte na żywicach epoksydowych należą do tej samej grupy materiałów konstrukcyjnych co kleje konstrukcyjne. Tego rodzaju powinowactwo materiałowe powoduje, że połączenia klejowe dla materiałów kompozytowych są „naturalnymi” połączeniami. Poza kompozytami materiałem konstrukcyjnym, który również z powodzeniem jest łączony techniką klejenia jest stop aluminium serii EN AW-2024-T3 wykorzystywany m.in. przez Doktoranta w swojej pracy. Większość obecnie eksploatowanych statków powietrznych ma płatowce wykonane z tego stopu aluminium, a połączenia klejowe są stosowane w wytwarzaniu np. konstrukcji przekładkowych stosowanych na szeroką skalę w ich budowie.

Istotnym etapem wykorzystania połączeń klejowych w budowie maszyn jest etap projektowania połączeń i prognozowania ich wytrzymałości doraźnej. Zadania projektowe, w których występują połączenia klejowe są o tyle złożone, że podczas przygotowania modelu obliczeniowego na potrzeby nowoczesnych narzędzi obliczeniowych, opartych np. na metodzie elementów skończonych napotyka się na „silną” nieliniowość geometryczną związaną ze stosunkowo niewielką grubością spoin klejowych w odniesieniu do grubości łączonych elementów czy na nieliniowość materiałową związaną m.in. z różnymi wartościami modułów Younga spoiny klejowej i łączonego elementu np. metalowego. Pomijając osobliwości, które pojawiają się przy wykonywaniu symulacji numerycznych, ww. nieliniowości mają również wpływ na dokładność otrzymywanych wyników i w konsekwencji na dokładność prognozowania wytrzymałości doraźnej połączeń klejowych. Doktorant, aby poprawić dokładność prognozowania wytrzymałości tego rodzaju połączeń zaproponował uwzględniać niejednorodności w spoinie klejowej wywołane zjawiskiem pozornego modułu Younga. W tym celu wykonał wieloetapowe badania eksperymentalne jak i analizy z wykorzystaniem zarówno narzędzi statystycznych jak i narzędzi numerycznych. Dla poszczególnych etapów pracy przygotował metodyki badawcze na bazie których konsekwentnie realizował testy eksperymentalne, symulacje numeryczne oraz analizy o charakterze porównawczym. W swoich badaniach wykorzystywał połączenia dwunakładkowe, w których tworzywem adhezyjnym była grupa epoksydowych klejów konstrukcyjnych o różnych modułach Younga (tzw. kleje sztywne i elastyczne). Połączenia klejowe przygotowywał na bazie dwóch materiałów, tzn.: stopu aluminium EN AW-2024T3 oraz stali o podwyższonej odporności na korozję 1.4301. Oprócz różnych klejów i różnych klejonych materiałów w testach eksperymentalnych wykorzystywał połączenia o dwóch grubościach spoiny klejowej: 0,05 mm i 0,10 mm. Wykorzystując technikę badań nanoindentacyjnych zdefiniował dla różnych wariantów połączeń klejowych charakterystyki zmiany wartości modułu Younga wzdłuż grubości spoiny

klejowej, które następnie zastosował przy definiowaniu modeli materiałowych spoiny klejowej w symulacjach numerycznych.

Otrzymując lepsze dokładności w prognozowaniu wytrzymałości połączeń klejowych potwierdził przydatność swojego rozwiązania i jednocześnie potwierdził, że jego działania są celowe i pożyteczne.

3. Ocena rozprawy

Do podstawowych zalet rozprawy pod względem wyboru metod i zakresu badań, opracowania i prezentacji wyników oraz badawczego wkładu Doktoranta zaliczam:

- a) podjętą tematykę,
- b) opracowanie logicznego planu realizacji badań i analiz statystycznych oraz numerycznych z wykorzystaniem nowoczesnych narzędzi badawczych i analitycznych,
- c) wieloaspektowe i wieloetapowe badania eksperymentalne oraz wielopoziomowe analizowanie otrzymywanych wyników,
- d) ilościowe zdefiniowanie zjawiska pozornego modułu Younga w badanych spoinach połączeń klejowych i potwierdzenie potrzeby uwzględniania tego zjawiska przy rozpatrywaniu pola naprężeń w spoinach klejowych o grubościach poniżej 0,1 mm,
- e) potwierdzenie, że uwzględnianie zmiany modułu Younga w funkcji grubości spoiny może poprawić dokładność symulacji numerycznych połączeń klejowych,

Doktorant powołuje się na 143 publikacje naukowe i strony internetowe, co jest wystarczającą liczbą w przypadku pracy doktorskiej. Analiza literatury została wykonana rzetelnie i jest zaprezentowana na ponad 60 stronach. Wnioski z analizy literatury uzasadniają sformułowanie hipotezy badawczej.

Recenzowana praca jest rozwiązaniem problemu naukowego i wnosi oryginalny wkład w rozwój inżynierii mechanicznej, za który uważam: i) zdefiniowanie: zasięgu i wielkości zmian modułu Younga w spoinie połączenia klejowego w wyniku oddziaływania zjawiska pozornego modułu Younga, ii) wykazanie, że pomiędzy wartościami modułów Younga tworzywa odlewanego a tworzywa w spoinie klejowej – nawet w jej środkowej strefie – mogą wystąpić ponad 100% różnice, oraz iii) wykazanie, że uwzględnianie tego zjawiska w symulacjach numerycznych poprawia ich dokładność.

Przedstawiona praca, w tym liczba wykonywanych testów i wykorzystanie nowoczesnych narzędzi badawczych, symulacyjnych i analitycznych, świadczy o bardzo dobrym przygotowaniu Doktoranta do planowania i prowadzenia testów eksperymentalnych, co stanowi dobrą podstawę do samodzielnego prowadzenia dalszych badań naukowych.

Lektura całości rozprawy sprawia bardzo pozytywne wrażenie. Poszczególne elementy pracy poukładane są logicznie a treści dodatkowo wzbogacone są rysunkami bardzo dobrej jakości.

Doktorant podsumowując wyniki swoich badań w sposób wyważony formuje wnioski słusznie stwierdzając, że w zależności od oczekiwanej dokładności wyników obliczeń można wykorzystać Jego propozycje lub stosować w definiowaniu spoiny klejowej inne modele, które dość dobrze reprezentują poziom wyężenia spoiny klejowej. Krytyczne podejście do wyników badań, w tym również własnych, dobrze świadczy o badawczej dojrzałości Doktoranta.

Rozprawa jest zaprezentowana w sposób przejrzysty, nie mam uwag co do prowadzonego eksperymentu czy oraz poprawności wnioskowania. Natomiast w ramach publicznej dyskusji chciałbym dowiedzieć się więcej o: i) występowaniu zjawiska pozornego modułu Younga w połączeniach, gdzie zamiast elementów metalowych są wykorzystywane elementy kompozytowe np. CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) – czy Doktorant może potwierdzić, że podobne mechanizmy odpowiedzialne za zjawisko zmiany modułu mogą wystąpić/występują w tego rodzaju połączeniach?, ii) o możliwości poprawy dokładności symulacji numerycznych na bazie jednowarstwowego modelu spoiny klejowej – czy zdaniem Doktoranta wykorzystując jednowarstwowy model spoiny, ale w którym zdefiniuje się wartość modułu nie na bazie tworzywa odlewanego, ale na bazie wartości z pomiarów nanoindentacyjnych np. ze strefy środkowej spoiny lub wartości średniej z pomiarów wzdłuż grubości (te wartości będą zawsze znacznie wyższe niż te uzyskane dla tworzywa odlewanego) otrzyma się w symulacjach numerycznych wyniki również o większej dokładności?

Przy lekturze pracy zauważyłem kilka pomyłek i niezręczności językowych, które nie mają istotnego wpływu na pozytywny odbiór pracy, w tym m.in.:

- str. 65. –opracowano *metodologię* badań doświadczalnych...- korzystniej w tym kontekście użyć słowa metodykę zamiast metodologię,
- str. 74. – ...do produkcji m.in. *poszycia* skrzydeł i kadłubów płatowców – korzystniej użyć słowa pokrycia zamiast poszycia (słowo poszycie było używane, kiedy do szkieletu konstrukcji lotniczej były przyszywane fragmenty specjalnie impregnowanego płótna, obecnie w statkach powietrznych w których fragmenty blachy np. ze stopu EN AW-2024T3 są do szkieletu nitowane czy przyklejane częściej mówi się o pokryciu),
- str. 79. – „...Próbki miały formę dwóch sklejonnych blach, o wstępnych wymiarach *40 × 60* mm.”- brakuje trzeciego wymiaru, chyba że coś przeoczyłem w tekście,
- ..., *frezowano* istotne geometryczne cechy... - niefortunne wyrażenie;

- str. 89, Rys. 4.15 – oznaczenie wymiaru *40* na rysunku jest niewłaściwe;
- str. 101, Rys. 5.7; str. 102, Rys. 5.8, str. 103, Rys. 5.9 i 5.10 – opis na osi pionowej „*Napężenie niszczące*” sugeruje pojedynczą wartość napężenia, natomiast na wykresach jest przedstawiona zarejestrowana zależność zmiany napężenia w funkcji wydłużenia próbek aż do zniszczenia – korzystniej jest na osi pionowej pozostawić etykietę „*Napężenie*”;
- str. 169. Pozycja literatury [72] wydaje się powtórzeniem pozycji [12];
- str. 173. Pozycje literatury [118] i [119] się powtarzają.

4. Wniosek końcowy

Biorąc pod uwagę zakres i poziom recenzowanej pracy doktorskiej, jej bezpośredni związek z praktyką inżynierską, duży potencjał aplikacyjny oraz brak poważnych uwag merytorycznych stwierdzam, że spełnia ona wymagania stawiane rozprawom doktorskim w rozumieniu obecnie obowiązującej ustawy. Wnioskuje zatem o dopuszczenie mgr inż. Kamila Anasiewicza do publicznej obrony Jego rozprawy.

