

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Andrzeja Kubita: „Determinanty  
wytrzymałości połączeń klejowych na oddzieranie”  
Promotor: dr hab. inż. Władysław Zielecki, prof. PRz**

1. Podstawy formalne i ogólna charakterystyka rozprawy

Recenzję wykonano w oparciu o zlecenie Rady Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej im. I. Łukasiewicza, wyrażone w piśmie RM-530-07-02/2015 Dziekana Wydziału prof. dr hab. inż. Jarosława Sępa.

Analizowana rozprawa została napisana na 154 stronach maszynopisu i zawiera:

- wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów,
- wprowadzenie,
- rozdział pierwszy, zawarto w nim analizę stanu wiedzy w oparciu o analizowaną literaturę,
- rozdział drugi, przedstawiono w nim cel, hipotezę badawczą i program badań,
- rozdział trzeci, zawarto w nim obszerny opis metodyki badań,
- rozdział czwarty, przedstawiono w nim problematykę rozkładu naprężenia w złączu klejowym,
- rozdział piąty, zawarto w nim wyniki analizy wpływu zmian konstrukcyjnych strefy przykrawędziowej połączenia na zmniejszenie spiętrzenia naprężeń normalnych w warstwie kleju,
- rozdział szósty, przedstawiono w nim wyniki badań wpływu nanonapełniaczy na właściwości klejów epoksydowych oraz połączeń klejowych,
- rozdział siódmy, zawarto w nim propozycję przyspieszonych badań wytrzymałości zmęczeniowej na oddzieranie połączeń klejowych,

- rozdział ósmy, zawierający podsumowanie i wnioski końcowe,
- spis literatury.

Struktura rozprawy jest typowa dla rozpraw doktorskich o charakterze badawczym. Powinna także zawierać syntetyczne streszczenie, wynika to z § 5.1 ROZPORZĄDZENIA MINISTRA NAUKI I SZKOLNICTWA WYŻSZEGO z dnia 22 września 2011 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora. Takie streszczenie nie musi być integralną częścią rozprawy, może być dołączone w postaci odrębnego pliku.

## 2. Ocena tematu rozprawy oraz zakresu badań i analiz

Problematyka podejmowana przez Doktoranta jest ważna, aktualna i perspektywiczna. Połączenia klejowe zyskują coraz większe zaufanie konstruktorów maszyn i urządzeń, głównie dzięki postępom w tworzeniu bardziej wiarygodnych prognoz wytrzymałości takich połączeń. Zalety połączeń klejowych sprawiają, że jest duże zapotrzebowanie na badania nowych kompozycji klejowych i ich cech w eksploatacji w różnych warunkach.

Temat rozprawy, choć jest syntetyczny i dość atrakcyjny w formie, nie oddaje jednak w pełni zawartości rozprawy. Determinanty wytrzymałości w tytule rozprawy sugerują, że rozprawa dotyczy problemu identyfikacji, a więc budowy modelu fizycznego połączenia, a następnie, ze zbioru zidentyfikowanych zmiennych niezależnych, wybór, na podstawie badań, tych czynników, których wpływ na wytrzymałość na oddzieranie jest kluczowy.

Tak jednak nie jest, Doktorant zajmuje się, określonym ‘apriorycznie’, wpływem modyfikacji konstrukcyjnej strefy przykrawędziowej, specyficznego połączenia dwóch elementów o znacząco różnej sztywności na zginanie, oraz wpływem modyfikacji wybranych kompozycji klejowych z zastosowaniem nanonapełniaczy na rozkład naprężeń i wytrzymałość połączeń.

Należy jednak podkreślić, że zakres przeprowadzonych analiz i eksperymentów, użyte narzędzia wspomagające pracę badawczą, niektóre nowatorskie podejścia badawcze, zasługują na uznanie i świadczą o pracowitości i dociekliwości Doktoranta, a także dość dobrych już Jego kompetencjach.

W tym kontekście pozytywnie oceniam zakres podjętej problematyki, jej nowoczesność i istotność z naukowego i praktycznego punktu widzenia.

### 3. Ocena doboru źródeł i ich analizy

Doktorant przeanalizował literaturę obejmującą 148 pozycji. Jest to zbiór piśmiennictwa przede wszystkim anglojęzycznego, w większości wydanego w ostatnich 10 latach, w tym także kilka stron internetowych. W przypadku tych ostatnich warto podawać datę otwierania strony, są one bowiem dynamiczne w treści, odczytane dane mogą być już usunięte. Sądzę, że analizowana literatura jest w wystarczająco dobrym stopniu reprezentatywna dla problematyki rozprawy i odpowiada standardom przyjętym w tym względzie dla rozpraw doktorskich.

### 4. Ocena wartości naukowej zawartej w rozprawie i wnioski ogólne

Biorąc pod uwagę ocenę rozprawy w kontekście spełniania wymagań § 13.1 *Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki*, należy stwierdzić, że Doktorant spełnił te wymagania poprzez:

1. Oryginalne rozwiązanie problemu naukowego dotyczącego oceny wpływu modyfikacji konstrukcyjnej analizowanych połączeń klejowych na ich wytrzymałość oraz wpływu nanonapełniaczy na niektóre właściwości fizyczne połączeń. Oryginalność tego rozwiązania polega przede wszystkim na zastosowaniu nowatorskiego podejścia do oceny odkształceń połączeń klejowych z wykorzystaniem komputerowej analizy obrazu oraz opracowaniu metody przyspieszonych badań zmęczeniowych tych połączeń.
2. Doktorant wykazał się adekwatną do standardów przewodu doktorskiego wiedzą ogólną i szczegółową, odpowiadającą specyfice dyscypliny w której ubiega się o stopień naukowy doktora.
3. Doktorant wykazał, że potrafi samodzielnie prowadzić badania naukowe, posługując się przy tym zaawansowanymi narzędziami wspomagającymi te badania.

Z lektury rozprawy wynikają także pewne niejasności i uwagi, do skomentowania ich proszę Doktoranta w odpowiedzi na recenzję. Ważniejsze z nich są następujące:

1. Doktorant nie uzasadnia w oparciu o jakie kryteria przyjęto rozmiary próbek. Jest oczywiste, że rozkład naprężenia w połączeniu silnie zależy od sztywności na zginanie łączonych elementów, a ściślej elementu o mniejszej grubości, jeśli

założymy, że element drugi posiada wielokrotnie większą sztywność i jego odkształcenia mogą być pominięte. Przy pewnej granicznej grubości elementu I i obciążeniu jakiego przykładu Doktorant, nastąpi wygięcie tego elementu. Zależy to także od punktu przyłożenia siły, na rys. 3.14 jest to 48 mm od krawędzi elementu II. Zbyt duża sztywność na zginanie elementu I spowoduje mimośrodowe odrywanie próbek. W obu przypadkach trudno mówić o klasycznym oddzieraniu, w którym z reguły przykładano się siłę pod kątem prostym (lub większym, czasem nawet do  $180^\circ$ ) do powierzchni sklejenia, a więc element o mniejszej sztywności jest rozciągany a nie zginany. Proszę o komentarz Doktoranta w tej kwestii

2. Przyjęcie w założeniach odkształceń wyłącznie sprężystych spoiny klejowej przeczy idei oddzierania, gdzie praca odkształcenia plastycznego jest tak duża, że dla podtrzymania procesu dekohezji niezbędne jest ciągle dostarczanie energii z zewnątrz, badanie na oddzieranie ma sens dla przypadków dla których wyklucza się katastroficzne, a więc gwałtowane, pękanie. Jak w tym kontekście Doktorant ocenia adekwatność przyjętego modelu w badaniach MES oraz sposób badania wytrzymałości statycznej?
3. Czy Doktorant nie obawia się, że przyjęcie częstotliwości na poziomie (580 – 610) Hz w badaniach zmęczeniowych polimerów może prowadzić do błędnych wniosków?. W takich badaniach częstotliwość z reguły nie powinna przekraczać 30 Hz. W warunkach wyższych częstotliwości może w utwardzonych tworzywach polimerowych pojawić się efekt „temperatury samowzbudnej”, prowadzący lokalnie do gwałtownych zmian właściwości utwardzonego polimeru. Wspomiane przez Doktoranta problemy z utrzymaniem częstotliwości rezonansowej mogły być spowodowane szybką zmianą tłumienia w strefie skleiny w następstwie tego efektu. Proszę Doktoranta o komentarz w tej kwestii.
4. Co Doktorant rozumie pod pojęciem wytrzymałości na oddzieranie?. Na rys. 5.11-5.13 na osi rzędnych jest siła niszcząca w N, a w podpisie „Wyniki badań wytrzymałości.....” Czy siła niszcząca i wytrzymałość to dla Doktoranta wielkości tożsame?
5. Jak Doktorant określał wartość siły niszczącej?. W rozprawie są tylko wyniki w postaci wykresów słupkowych, brak jest choć jednego charakterystycznego przebiegu wartości siły w funkcji przemieszczenia. Wiadomo, że wartość tej siły, w przypadku badań Doktoranta, jest funkcją ramienia na jakim została przyłożona, czy nie korzystniej było posługiwać się wartością niszczącego momentu gnącego?

6. Wniosek, że zmniejszenie SEP utwardzonego kleju z napełniaczem wpływa na większą adhezję takiego kleju jest nieuprawniony, mógłby być formułowany na podstawie badań napięcia powierzchniowego tak modyfikowanego kleju w stanie ciekłym, o efektach zwilżania decyduje także lepkość, a ta dla kleju z napełniaczem jest większa, a więc nie ułatwia zwilżania. Proszę o komentarz.
7. Równania regresji liniowej w tab. 7.6-7.17 nie są zgodne wymiarowo, poza tym są one słuszne jedynie dla określonego poziomu naprężenia przy którym określono trwałość zmęczeniową. Formułując takie równania należy sprowadzać je do zgodności wymiarowej zaznaczając jednocześnie dla jakich jednostek zostały one określone.
8. Jak wytłumaczyć tak dużą różnicę naprężenia normalnego wzdłuż osi i w strefie krawędzi (ponad 3-krotna), przedstawione na rys. 4.24?
9. Jak interpretować mapę przemieszczenia względem osi X z lokalnymi zmianami przemieszczenia na rys. 4.11?
10. Jaki był rozkład ziarnowy nanocząstek  $\text{SiO}_2$  i  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , jest to istotne z punktu widzenia specyfiki wpływu na właściwości matrycy epoksydowej cząstek o różnej wielkości?

Należy podkreślić, że Doktorant w swoich pracach wykazał się także ciekawymi propozycjami w zakresie metod badań, szkoda tylko, że wyraźnie nie zaznaczył, że opracował je jedynie dla celów rozprawy i dla badań porównawczych. Zaproponowane rozwiązania w zakresie metod badań wytrzymałości, zarówno statycznej jak i zmęczeniowej budzą zastrzeżenia, zwłaszcza dlatego, że uzyskane wyniki i formułowane na ich podstawie wnioski są jedynie słuszne dla warunków eksperymentu w jakich te badania zostały przeprowadzone.

Za pozytywne w badaniach przeprowadzonych przez Doktoranta uważam:

- opracowanie metodyki i przeprowadzenie pomiarów odkształceń warstwy kleju z wykorzystaniem komputerowej analizy obrazu, w tym autorskie elementy w tej metodyce,
- wykonanie interesujących badań wpływu napełniaczy na właściwości cieplne utwardzonych tworzyw z wykorzystaniem skaningowej kalorymetrii różnicowej,
- przeprowadzenie interesujących analiz i badań dotyczących modyfikacji strefy przykrawędziowej przyłączy w połączeniach klejowych,
- umiejętność posługiwania się złożonymi narzędziami wspomagającymi procesy wnioskowania takimi jak statystyka matematyczna czy modelowanie MES.

W efekcie uważam, analizując słabe i mocne strony rozprawy, że wyniki analizy studialnej i prac badawczych zawarte w rozprawie, istotnie wzbogacają wiedzę w zakresie

możliwości implementacji niektórych wyników Doktoranta do rozwoju metod badawczych oraz zastosowania praktycznego, oczywiście po odpowiednim dopracowaniu szczegółów metodologicznych.

#### 5. Ważniejsze uwagi dotyczące edycji rozprawy

W ocenie ogólnej edycję rozprawy należy ocenić dość dobrze. Rozprawa napisana jest poprawnym językiem technicznym, poprawnym gramatycznie, zdania budowane są logicznie. Strona graficzna rozprawy jest bez zastrzeżeń. Muszę jednak zwrócić Autorowi uwagę na pewne elementy językowe i edytorskie, jest ich dość dużo, ograniczę się do ważniejszych, mam nadzieję, że w przyszłej pracy naukowej Autor je uwzględni. Ważniejsze z nich są następujące:

- Doktorant używa wielu zwrotów potocznych, należy tego unikać, język inżyniera powinien być precyzyjny, dla przykładu: „jeśli idzie” (str.5), „szalenie ważna” (str. 9), „rozważania na tych kartach” (str. 15), „wyższość klejenia” (str. 11), „wytrzymałość temperaturowa” (str. 24), „zachodzi przy zejściu” (str. 45), „manipulacji parametrem” (str. 81) i in.
- co oznacza „odkształcenie wzdłuż obszaru skleiny”, obszar to przecież jakaś powierzchnia?
- podrozdziały często kończą się rysunkiem, nie jest to wydawniczo eleganckie,
- Doktorant wielokrotnie używa określenia „ukazane” na rys.... jest to klasyczny rusycyzm, w pracy naukowej zdecydowanie należy tego unikać,
- na rys. 4.4 siatka elementów jest kompletnie niewidoczna,
- Doktorant wielokrotnie używa określenia „zawartość wagowa”, udział napełniacza czy innej substancji może być masowy lub objętościowy,
- Rys. 1.23 bez podania wymiarów próbek jest kompletnie bezwartościowy, jest to zaczerpnięte z literatury, takich przykładów w rozprawie jest kilka, być może w materiale źródłowym takie dane były, należy być bardziej krytycznym wobec tego co czerpiemy z literatury,
- skąd wzięła się liczba 2 w zależności 38?
- jaką wartość informacyjną ma rys. 4.16 przedstawiający zależność przemieszczenia w funkcji czasu badania, dla przedziału (0-4)s?,
- nie można mówić o wzroście wytrzymałości Epidianu 57 (str. 145), bez utwardzacza jest to tylko żywica.

## 6 . Podsumowanie i wniosek końcowy

Przeprowadzone prace studialne, analiza teoretyczna oraz opracowany, przeprowadzony i odpowiednio dyskutowany eksperyment, w odczuciu opiniującego stanowią zamkniętą i istotną część ważnej problematyki w technice i technologii. Uważam, że wykonanie tej pracy wzbogaca wiedzę Doktoranta o złożonych problemach połączeń adhezyjnych, także problemach metodologicznych w ich badaniach. Szczególnie należy podkreślić zdobytą wiedzę i umiejętności, zarówno w posługiwaniu się złożonymi narzędziami wspomagającymi pracę inżyniera jak też, co warto podkreślić, nabycie umiejętności tworzenia własnych narzędzi w tym obszarze. Uzasadnionym wydaje się stwierdzenie, że w wyniku realizacji tej rozprawy Doktorant zdobył ważne umiejętności o charakterze poznawczym i praktycznym. Wykonana rozprawa w ramach projektu kluczowego P.O.I.G 01.01.02-00-015/08-00 „Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym” w pewien sposób wzbogaca wiedzę na temat konstrukcji i technologii połączeń klejowych. Jest to szczególnie ważne dla przemysłu lotniczego, w dużej skali wykorzystującego klejenie jako kluczową technologię w budowie statków powietrznych.

Analizowana rozprawa doktorska, pomimo usterek i przedstawionych niejasności, w moim przekonaniu spełnia, w dość dobrym stopniu, wymagania w rozumieniu Ustawy z dnia z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. 2003 Nr 65 poz. 595), zwłaszcza §13.1, jak też standardy zawarte w ROZPORZĄDZENIU MINISTRA NAUKI I SZKOLNICTWA WYŻSZEGO z dnia 22 września 2011 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora i wnioskuje o dopuszczenie mgr inż. Andrzeja Kubita do publicznej dyskusji nad jego rozprawą doktorską w dyscyplinie *budowa i eksploatacja maszyn*.

