

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Izabeli Miturskiej nt.  
„Badania wpływu modyfikacji kompozycji epoksydowych napelniaczami na wybrane  
właściwości połączeń klejowych”

Niniejszą recenzję opracowano na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej  
Inżynieria Mechaniczna dra hab. inż. Piotra Budzyńskiego – pismo nr WM/181/2020  
z dnia 21 grudnia 2020 r.

### 1. Ogólna, formalna charakterystyka pracy

Recenzowana rozprawa została przedstawiona na 196 stronach maszynopisu i zawiera poza spisem treści, wykazem oznaczeń i skrótów oraz wprowadzeniem:

- rozdział drugi, w którym Doktorantka dokonała przeglądu literatury dotyczącej: klejenia konstrukcyjnego (wad i zalet połączeń adhezyjnych, zjawiska adhezji, klasyfikacji klejów, technologii klejenia - w tym m.in. procesu przygotowania kompozycji klejowej, czynników wpływających na wytrzymałość połączeń klejowych, metod badania klejów w stanie utwardzonym i badania połączeń klejowych, zastosowania połączeń klejowych) oraz możliwości modyfikacji fizycznej klejów epoksydowych i wpływu modyfikacji na wytrzymałość kompozycji klejowych w stanie utwardzonym i na wytrzymałość zakładkowych połączeń elementów aluminiowych. W rozdziale tym opisano również właściwości wybranych napelniaczy, sposoby przygotowania stopów aluminium do klejenia oraz sformułowano wnioski wynikające z przeglądu bogatej literatury,

- rozdział trzeci zawierający cel i zakres pracy,
- rozdział czwarty opisujący plan i metodykę badań eksperymentalnych,
- rozdział piąty, w którym przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań eksperymentalnych,
- rozdział szósty będący wnioskami z przeprowadzonych badań i analiz,
- wykaz cytowanej literatury, zawierający 171 pozycji,
- streszczenie w języku polskim i angielskim,
- spis rysunków,

spis tabel.

## **2. Ocena tematu i zakresu pracy**

W przedłożonej pracy Doktorantka rozwinęła temat dotyczący możliwości poprawy właściwości wytrzymałościowych i użytkowych epoksydowych kompozycji klejowych w stanie utwardzonym poprzez ich fizyczną modyfikację napełniaczami i wytrzymałości klejowych połączeń zakładkowych wykonanych na bazie modyfikowanych klejów oraz podjęła próbę poszukiwania korelacji pomiędzy właściwościami klejów w stanie utwardzonym i wytrzymałością połączeń klejowych. Technologiczne zabiegi zmiany właściwości wytrzymałościowych i użytkowych klejów epoksydowych w stanie utwardzonym poprzez ich fizyczną modyfikację oraz podwyższenia nośności połączeń klejowych po zastosowaniu modyfikowanych klejów są znane, ale raczej z nielicznych publikacji. Doktorantka przeprowadziła wieloetapowe badania eksperymentalne w celu przygotowania epoksydowych kompozycji klejowych o korzystniejszych parametrach wytrzymałościowych i użytkowych, które po zastosowaniu w klejeniu stopu aluminium EN AW 2024T3 umożliwią przygotowanie połączeń o lepszej nośności (wytrzymałości doraźnej). Na etapie poszukiwania optymalnych rozwiązań materiałowych i technologicznych zostały również wykonane badania związane z udoskonaleniem technologii rozpraszania (równomiernego rozprowadzania) napełniaczy w kleju i technologii piaskowania powierzchni aluminiowych elementów do klejenia. Podejmowanie problematyki polepszenia właściwości klejów oraz zwiększania wytrzymałości połączeń klejowych, których udział w technikach montażu jest istotny, uważam za celowe i pożyteczne.

## **3. Ocena rozprawy**

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

- a) podjętą tematykę,
- b) opracowanie planu realizacji badań eksperymentalnych i metodyki statystycznej analizy wyników,
- c) wieloaspektowe i wieloetapowe badania eksperymentalne (wytrzymałościowe klejów w stanie utwardzenia i wytrzymałościowe połączeń klejowych, termofizyczne klejów, technologii piaskowania oraz chropowatości i topografii 3D piaskowanych powierzchni, technologii mieszania napełniaczy w żywicy epoksydowej),

- d) optymalizację procesu zwiększania wytrzymałości tworzyw adhezyjnych w stanie utwardzenia (w obszarze fizycznego modyfikowania kompozycji klejowej napelniaczami oraz w obszarze technologii mieszania składników modyfikowanych klejów)
- e) optymalizację procesu zwiększania wytrzymałości doraźnej/nośności połączeń klejowych wykonywanych na bazie modyfikowanych klejów (również w obszarze technologii piaskowania klejonych elementów).

Doktorantka powołuje się na 171 publikacji naukowych, co jest dużą liczbą w wypadku pracy doktorskiej. Analiza literatury zajmuje ponad 60 stron i nie dotyczy tylko technologii klejenia i klejów konstrukcyjnych, które są obiektem badań, ale również np. charakterystyki stopów aluminium. Przeprowadzona wieloaspektowa analiza właściwości klejów konstrukcyjnych i samego procesu klejenia musiała być miejscami, ze względu na obszerność tematyki, powierzchowna. Stąd w analizie literatury, moim zdaniem, niepotrzebnie dodatkowo powtarzane są fragmenty dotyczące: zalet i wad połączeń klejowych, zjawiska adhezji i kohezji klejów czy rozważania dotyczące konieczności przygotowania powierzchni do klejenia.

Recenzowana praca wnosi oryginalny wkład w rozwój inżynierii mechanicznej, za który uważam opracowaną metodykę optymalizacji procesu równomiernego rozpraszania napelniaczy w kompozycji klejowej oraz wykazanie korelacji między właściwościami wytrzymałościowymi modyfikowanych klejów w stanie utwardzonym oraz wytrzymałością doraźną połączeń klejowych, w których stosowano modyfikowane kompozycje. Przedstawiona praca, w tym liczba wykonywanych testów, świadczy o przygotowaniu Doktorantki do planowania i prowadzenia badań eksperymentalnych, co stanowi dobrą podstawę do samodzielnego prowadzenia dalszych badań naukowych. Lektura całości rozprawy sprawia pozytywne wrażenie. Jednak, jak zauważa we wnioskach sama Doktorantka, przedstawione wyniki z badań dotyczą bardzo wąskiej grupy napelniaczy i praktycznie jednego tworzywa adhezyjnego i nie mogą być podstawą do formułowania wniosków bardziej ogólnych.

Rozprawa jest zaprezentowana w sposób logiczny, nie mam również poważniejszych uwag co do prowadzonego eksperymentu oraz poprawności wnioskowania. Chciałbym jednak dowiedzieć się więcej o motywacji przyjęcia udarności jako kryterium weryfikacji jakości mieszania kompozycji klejowej. Z lektury opracowania nie wynika również, w jaki sposób nakładana była kompozycja klejowa w trakcie przygotowania połączeń oraz czy wstępne podgrzewanie żywicy epoksydowej do temp 50°C ograniczyło czas efektywnego wykorzystania kompozycji klejowej. W pracy nie znalazłem również jednoznacznej informacji na temat czasu utwardzania paneli połączeń klejowych techniką worka próżniowego (7 dni?).

Inspiracją do dyskusji jest również zakres temperatury wykonywania badań cieplnych (termofizycznych), tzn. od 20°C do 220°C – gdzie górna wartość temperatury znacznie przekracza wartości eksploatacyjne definiowane dla badanych tworzyw.

Przy lekturze pracy zauważyłem kilka pomyłek i niezręczności językowych:

- „czynności bezpośrednio poprzedzające utworzenie połączeń” – brakuje litery „a” – str. 20,
- „Parametrami technologicznymi utwardzania spoiny klejowej są: powyżej nacisk...”- str. 29,
- na str. 54 powinno być odwołanie do rys. 2.19,
- wytrzymałość na zginanie tworzywa modyfikowanego opisywanego na str. 59 - równa 940,57 MPa - wydaje się wartością mocno przewymiarowaną,
- na str. 63 zdefiniowano właściwości stopu aluminium EN AW 2017A - w tym m.in. jego *dobrą spawalność*, kiedy ten stop aluminium jest raczej niespawalny,
- na str. 65 jest zapis „Stop ten charakteryzuje się.....lekkością...” – określenie „lekkość” jako cecha materiałów nie jest pojęciem technicznym,
- na str. 66 opisując sposób przygotowania powierzchni aluminium i stopów aluminium do procesu klejenia zapisane jest stwierdzenie, że „Najczęściej stosowaną obróbką jest obróbka mechaniczna” – zapis wydaje się dyskusyjny, kiedy uwzględni się np. wykonywanie połączeń klejowych w konstrukcjach lotniczych,
- na str. 68 jest zapis, że „Obróbka mechaniczna będzie relatywnie tańsza oraz mniej inwazyjna i mniej szkodliwa jako sposób przygotowania powierzchni od obróbki elektrochemicznej” oraz na str. 175 jest sformułowany wniosek, że „W przypadku klejenia stopów aluminium najlepszym sposobem jest piaskowanie”. Jeżeli uwzględni się trwałość zmęczeniową połączeń klejowych, w których powierzchnie elementów do klejenia przygotowuje się z wykorzystaniem obróbki mechanicznej/piaskowania okaże się, że jednak ten sposób przygotowania powierzchni będzie bardziej szkodliwy i nie jest to najlepszy sposób przygotowania powierzchni do klejenia,
- „ilość powtórzeń” str. 73 – powinno być liczba powtórzeń,
- w wytrzymałości materiałów nie definiuje się „modułu rozciągania” i „modułu ściskania” – str. 97,

- na str. 152 jest zapis, że „*Wzrost wartości wytrzymałości na rozciąganie kompozycji świadczy również o wzroście modułu Younga, a jego zmiana jest bardzo istotna, szczególnie w przypadku później wykonywanych połączeń konstrukcyjnych, gdyż wzrost wartości współczynnika sprężystości wzdłużnej związany jest ze wzrostem naprężeń stycznych w tych połączeniach*” – wytrzymałość na rozciąganie materiału i jego moduł Younga są parametrami niezależnymi,
- str. 156 i 157 są stronami powtórzonymi,
- na str. 163 jest zapis, że „*Dla kompozycji modyfikowanych napelniaczem 1% ZR2 występuje pik endotermiczny w temperaturze 43-58°C (co może świadczyć o spalaniu lub krystalizacji cząstek napelniacza)*” – spalanie ZR2 w takiej temperaturze wydaje się mało prawdopodobne.

#### **4. Wniosek końcowy**

Biorąc pod uwagę zakres i poziom recenzowanej pracy doktorskiej, jej bezpośredni związek z praktyką inżynierską oraz brak poważnych uwag merytorycznych stwierdzam, że spełnia ona wymagania stawiane rozprawom doktorskim w rozumieniu art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, Dziennik Ustaw nr 65, poz. 595. Wniosuję zatem o dopuszczenie mgr inż. Izabeli Miturskiej do publicznej obrony Jej rozprawy.