

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Eweliny Ozgi nt.
„Wpływ procesu pneumokulkowania na nośność połączeń klejowych ze stopu aluminium
EN AW-2024-T3”

Niniejszą recenzję opracowano na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria
Maechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza
dra hab. inż. Andrzeja Burhardta, prof. PR
pismo nr RM-530-31-02/2024
z dnia 10 stycznia 2024 r.

1. Ogólna, formalna charakterystyka pracy

Recenzowana rozprawa została przedstawiona na 152 stronach maszynopisu i zawiera poza spisem treści, wykazem ważniejszych oznaczeń, spisem rysunków, spisem tabel oraz wprowadzeniem:

- rozdział pierwszy, w którym Doktorantka dokonała przeglądu literatury dotyczącej: mechanizmów powstawania połączenia adhezyjnego, metod przygotowania powierzchni elementów przeznaczonych do klejenia, wytrzymałości połączeń klejowych i problematyki obciążania ich termicznie oraz technologicznych i konstrukcyjnych zabiegów stosowanych w celu zwiększenia nośności połączeń;

- rozdział drugi poświęcony technologicznym procesom nagniatania elementów metalowych, w tym szczególnie procesowi pneumokulkowania, co jest uzasadnione tematem rozprawy doktorskiej. Autorka rozprawy w tym rozdziale przeprowadziła również analizę wpływu nagniatania dynamicznego na właściwości fizyczne wierzchniej warstwy obrabianego materiału oraz na właściwości wytrzymałościowe i użytkowe obrabianych przedmiotów, w tym także połączeń klejowych;

- rozdział trzeci, który zawiera ocenę stanu zagadnienia i wnioski wynikające z szerokiego przeglądu literatury;

- rozdział czwarty zawierający hipotezę badawczą, cele pracy i jej zakres;

- rozdział piąty, w którym zaprezentowano wykorzystywane w pracy narzędzia badawcze (m.in.: do oceny intensywności pneumokulkowania, badania struktury geometrycznej

powierzchni i analizy stanu naprężeń własnych) oraz stosowane metodyki badawcze. W rozdziale scharakteryzowano również materiały stosowane w badaniach eksperymentalnych, technologię wykonywania połączeń i przyjęte warianty pneumokulkowania oraz warunki brzegowe symulacji numerycznych wykonywanych w środowisku obliczeniowym Ansys.

- rozdział szósty zawierający wyniki: badań eksperymentalnych, analiz statystycznych i symulacji numerycznych;
- podsumowanie i wnioski,
- wykaz cytowanej literatury, zawierający 156 pozycje,
- streszczenie w języku polskim i angielskim.

2. Ocena tematu i zakresu pracy

W przedłożonej pracy Doktorantka podjęła się rozwiązywania zagadnień związanych z podwyższaniem nośności połączeń klejowych poprzez zastosowanie procesu pneumakulkowania - czyli technologicznego procesu dynamicznego nagniatania klejonych elementów połączenia. Ponieważ badania dotyczyły metalowych elementów wykonywanych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 w swoich badaniach i analizach przeprowadziła również skuteczną próbę poszukiwania korelacji pomiędzy parametrami technologicznymi procesu pneumokulkowania (i jego skutkami, w tym – chropowatości kulkowanej powierzchni czy stanem naprężeń własnych w obrabianym materiale) a nośnością połączeń klejowych. W pracy została również podjęta próba prognozowania wzrostu nośności połączeń po pneumokulkowaniu na bazie najbardziej miarodajnych parametrów, za pomocą których mierzony jest poziom reakcji stopu aluminium na proces dynamicznego nagniatania.

Obecnie wykorzystywanych jest wiele metod podwyższania nośności połączeń klejowych zarówno w obszarze technologicznym jak i konstrukcyjnym, z których pneumokulkowanie wydaje się, jak zauważyła sama Doktorantka metodą „interesującą” i z „dużym potencjałem”, jednak wciąż „mało poznana”. Doktorantka wykonała zarówno wieloetapowe badania eksperymentalne jak i analizy z wykorzystaniem narzędzi statystycznych jak i narzędzi numerycznych. Dla poszczególnych etapów pracy przygotowała metodyki badawcze na bazie których konsekwentnie realizowała testy eksperymentalne oraz analizy o charakterze porównawczym. W swoich badaniach wykorzystywała typowe połączenia jednozakładkowe, w których tworzywem adhezyjnym był klej konstrukcyjny Loctite EA 3430. W badaniach wytrzymałościowych próbki montowano w maszynie wytrzymałościowej w taki sposób, aby ograniczyć wpływ mimośrodów na nośność połączeń. W symulacjach numerycznych wzrost

naprężeń własnych występujących w materiale po pneumokulkowaniu symulowano obciążeniami termicznymi, co wydaje się interesującym rozwiązaniem.

Konstrukcyjne połączenia klejowe, mimo że są używane w rozwiązaniach technicznych od kilkudziesięciu lat wciąż są obiektem zainteresowań badaczy na całym świecie. Tego rodzaju prawidłowość jest pochodną wielu czynników, w tym m.in. stosowaniem w połączeniach nowych, coraz bardziej efektywnych tworzyw adhezyjnych czy coraz szerszym wykorzystaniem w budowie maszyn polimerowych materiałów kompozytowych, których syciwa należą do tej samej grupy materiałów konstrukcyjnych co kleje konstrukcyjne. Tego rodzaju powinowactwo materiałowe powoduje, że połączenia adhezyjne dla materiałów kompozytowych są „naturalnymi” połączeniami i jednymi z bardziej efektywnych. Materiałem konstrukcyjnym, który również z powodzeniem jest łączony techniką klejenia, w różnych rozwiązaniach, jest stop aluminium serii EN AW-2024-T3. Większość obecnie eksploatowanych statków powietrznych ma płatowce wykonane z tego stopu aluminium a połączenia klejowe z powodzeniem są stosowane w wytwarzaniu np. konstrukcji przekładkowych stosowanych na szeroką skalę w konstrukcjach lotniczych.

Dlatego też badania, których celem jest poprawa nośności (wytrzymałości doraźnej) konstrukcyjnych połączeń klejowych, jako podstawowego parametru wytrzymałościowego tego rodzaju połączeń, jest działaniem celowym i pożytecznym, a prezentowana w pracy problematyka podwyższenia tego rodzaju parametru jest wciąż aktualna.

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 bardzo logicznego planu realizacji badań eksperymentalnych, analiz statystycznych i numerycznych z wykorzystaniem nowoczesnych narzędzi badawczych i analitycznych,
- c) wieloaspektowe i wieloetapowe badania eksperymentalne oraz wielopoziomowe analizowanie otrzymywanych wyników,
- d) zdefiniowanie najkorzystniejszych parametrów obróbki technologicznej pneumokulkowania wykonywanej w celu podwyższenia nośności połączeń klejowych przygotowanych na bazie stopu aluminium EN AW-2024-T3,

- e) zdefiniowanie próby Almena jako najlepszego narzędzia do kontroli procesu pneumokulkowania połączeń klejowych i narzędzia do przewidywania poziomu wzrostu nośności połączeń po obróbce umacniającej,
- f) wyjaśnienie, na podstawie symulacji numerycznych, mechanizmu zmiany rozkładów naprężeń w spoinie połączenia klejowego po pneumokulkowaniu.

Doktorantka powołuje się na 156 publikacji naukowych i stron internetowych, co jest wystarczającą liczbą w przypadku pracy doktorskiej. Analiza literatury została wykonana bardzo rzetelnie, jest zaprezentowana na ponad 50 stronach i uzasadnia sformułowanie hipotezy badawczej. W pracy zaprezentowano również bardzo szczegółowo metodyki wykonywania testów eksperymentalnych - łącznie z przywołaniem odpowiednich norm.

Recenzowana praca wnosi oryginalny wkład w rozwój inżynierii mechanicznej, za który uważam zaprezentowaną technologię podwyższania nośności połączeń klejowych przygotowywanych na bazie stopu aluminium EN AW-2024-T3 oraz wykazanie korelacji pomiędzy parametrami procesu pneumokulkowania połączeń a ich nośnością. Przedstawiona praca, w tym liczba wykonywanych testów i wykorzystanie nowoczesnych narzędzi badawczych i analitycznych, świadczy o przygotowaniu Doktorantki do planowania i prowadzenia badań eksperymentalnych, co stanowi dobrą podstawę do samodzielnego prowadzenia dalszych badań naukowych. Lektura całości rozprawy sprawia bardzo pozytywne wrażenie. Dodatkowo, co w podsumowaniu zauważa Doktorantka wspominając o zmiennym obciążeniu termicznym połączeń, dynamiczne nagniatanie stopu aluminium może poprawić nie tylko nośność połączeń – co w swojej pracy udowodniła Doktorantka – ale również ich trwałość zmęczeniową, czyli bardzo pożądaną w eksploatacji maszyn cechę użytkową połączeń.

Rozprawa jest zaprezentowana w sposób logiczny, nie mam również uwag co do prowadzonego eksperymentu oraz poprawności wnioskowania. W ramach publicznej dyskusji chciałbym dowiedzieć się: i) jak Doktorantka rozumie stwierdzenie zawarte na stronie 67, że „Właściwości mechaniczne i fizyczne stopu aluminium EN AW-2024-T3 różnią się w zależności od rodzaju i wymiarów produktu” i w jakim zakresie występują te różnice?, ii) w jaki sposób, podczas przygotowania połączeń, utrzymywano długość zakładki połączeń równą 12,5 mm, iii) jakie jest uzasadnienie definiowania na potrzeby symulacji numerycznej modułu sprężystości kleju równego 2000 MPa, kiedy klej wykorzystywany w testach eksperymentalnych miał moduł równy 3210 MPa (str. 68, tabela 5.6.).

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

- str. 4. – P_t – nośność połączeń klejowych (siła styczna powodującą ścinanie) – nieprecyzyjny opis w nawiasie,
- str. 4. – R_a – średnia arytmetyczna **rzędnych**,
- str. 16. – „...liczby cykli (**równiej** podstawie”,
- str. 17. Rys 1.3 w opisach na rysunku zamiast sformułowania „**rozciąganie**” korzystniej byłoby użyć sformułowania „odrywanie”,
- str. 18. – „W pewnym zakresie **temperatur** spadek...” – korzystniej jest używać słowa temperatury,
- str. 28. – „**Z** związku z powyższym”,
- m.in. str. 46 – „maksymalnych głównych naprężeń **normalnych**” – naprężenia główne z natury są normalne – wydaje się, że korzystniej jest stosować w języku polskim sformułowanie *maksymalne naprężenia główne*,
- str. 51. – „...odpowiadał **punktowi A** na wykresie [156]” – na rys. 2.14 nie zaznaczono punktu A,
- str. 53. – „Zgodnie z prawem **Bregga**...” – powinno być Bragga,
- str. 114. – „W tabeli **6.13** przedstawiono...” – powinno być W tabeli 6.14....
- str. 117÷119. – Tabele 6.18÷6.20 – legendy z wartościami naprężeń są mało czytelne.

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 obecnie obowiązującej ustawy. Wnioskuje zatem o dopuszczenie mgr inż. Eweliny OZGI do publicznej obrony Jej rozprawy.

