

Prof. dr hab. inż. Tadeusz Uhl
Katedra Robotyki i Mechatroniki
Akademia Górniczo – Hutnicza
Al. Mickiewicza 30
30-059 Kraków

Kraków 23. 01 .2024

Opinia o pracy doktorskiej pt. “Techniczne i technologiczne aspekty projektowania kompozytowych łopat do wirników nośnych śmigłowców” autorstwa mgr inż. Konrad Kozaczuk

1. Zagadnienie naukowe rozważone w rozprawie

W pracy doktorskiej Autor podjął bardzo ważny, z punktu widzenia praktycznego, problem projektowania kompozytowych łopat do wirników nośnych śmigłowców oraz problem projektowania procesu technologicznego wykonania łopat. Zaproponował klasyczne inżynierskie podejście do projektowanie tego typu konstrukcji integrujące projektowanie elementów kompozytowych i ich procesu technologicznego.

Do zagadnień naukowych w procesie projektowania łopat do wirników nośnych śmigłowców oraz projektowania procesu technologicznego ich wykonania Autor zaliczył zdefiniowanie wymagań konstrukcyjnych dla projektowanej łopaty, zaproponowanie struktury konstrukcji łopaty, wykonanie modeli aerodynamicznych i wytrzymałościowych, dobór materiałów łopaty, dobór technologii wykonania łopaty, analizę poszczególnych etapów wykonania łopaty oraz dobór parametrów poszczególnych procesów technologicznych.

Autor na bazie praktycznych doświadczeń z realizacji projektu zaprojektowania i wytworzenia łopaty śmigłowca ILX-27, opisuje poszczególne etapy procesu projektowania. Opisy te są na tyle szczegółowe, że pozwalają studiującemu pracę na ocenę zaawansowania zastosowanych metod oraz poprawności ich wyboru. Autor cały proces projektowania i wykonania łopaty wykonał kierując interdyscyplinarnym zespołem badawczym. Takie sformułowania i realizacja pracy, jest możliwa do zaakceptowania, ponieważ autor pracy doktorskiej wykorzystał wyniki zespołu do dyskusji uzyskanego rozwiązania i sformułowania wniosków oraz na ich bazie sformuł metody projektowania lub wytwarzania.

W rozdziale 1 Autor dokonał przeglądu historycznych i współczesnych konstrukcji łopat. Na końcu rozdziału Autor dokonał podsumowania, w którym stwierdził, że brak jest w literaturze ogólnodostępnej opisu całego procesu projektowania i

wytwarzania łożat wirnika głównego śmigłowców. Dostępne publikacje opisują tylko rozwiązania cząstkowych zadań, a nie dotyczą całości procesu, stąd motywacja podjęcia tematu pracy. Przegląd literatury wykonany przez Autora jest adekwatny do zaawansowania prac nad projektowaniem łożat śmigłowców. Zawiera on pozycje literaturowe zagraniczne, jak i wiele pozycji z jednostki reprezentowanej przez Autora. Proces projektowania i wytwarzania łożat, według mojej wiedzy stanowi tajemnicę firm produkujących śmigłowce lub firm produkujących łożaty, stąd uważam, że praca ma duże znaczenie dla praktyki projektowania i może być bezpośrednio wykorzystana jako kompendium wiedzy w tym zakresie.

2. Cel pracy i teza naukowa

W rozdziale zatytułowanym Teza rozprawy Autor przedstawił tezę i cel pracy.

Teza jest sformułowana jako; „ dzięki opracowaniu nowej, kompleksowej i zweryfikowanej w badaniach technologii łożat wirników nośnych możliwa jest poprawa osiągnięć technicznych wirnika oraz wykonanie łożat w warunkach produkcyjnych małych i średnich firm”.

Teza jest sformułowana prawidłowo, a treść pracy jest podporządkowana jej udowodnieniu. Cel pracy Autor sformułował w sposób następujący:

„Celem pracy jest opracowanie innowacyjnej technologii budowy łożat nośnych wirników śmigłowców obejmującej kompleksowo cały proces od koncepcji do badań kwalifikacyjnych”.

Powyższy cel jest dobrze zdefiniowanym zagadnieniem badawczo - wdrożeniowym ponieważ definiuje obszar badań oraz szczegółowo wskazuje na założenia, przy których ma być zrealizowany proces projektowania i wytwarzania łożaty kompozytowej. W szczególności, co jest szczególnie ważne proces dedykowany jest do realizacji przez małe i średnie firmy.

Cała treść pracy jest podporządkowana realizacji celu pracy. Cel pracy został osiągnięty, bo powstała łożata wirnika nośnego śmigłowca o wymaganych własnościach zaprojektowana i wykonana z zastosowaniem procesu zaproponowanego przez Autora. Praca jest interdyscyplinarna i ma bardzo szeroki zakres.

3. Ważność i aktualność zagadnienia naukowego rozpatrywanego w pracy

Praca dotyczy istotnego, z punktu widzenia praktycznego, procesu projektowania i wytwarzania łożat kompozytowych wirnika nośnego śmigłowca. Jak wynika z literatury oraz praktyki w tym zakresie, jest to zagadnienie fundamentalne dla rozwoju konstrukcji śmigłowców. Prezentowana praca zawiera szczegółowe i kompletne opisy zastosowanych metod, których zastosowanie jest wymagane do zaprojektowania i wytworzenia kompozytowych łożat wirnika nośnego śmigłowca. Autor dedykuje

metodę dla małych i średnich firm, zupełnie nie odnosi się do różnicy zaproponowanych metod do metod stosowanych przez duże firmy. Nie wspomina, czy łopaty wykonane przez duże firmy mają lepsze czy porównywalne własności.

Podsumowując ten aspekt oceny rozprawy należy stwierdzić, że praca dotyczy bardzo aktualnego problemu badawczo - wdrożeniowego jakim jest opracowywanie i wdrażanie procesu projektowania i procesu wytwarzania łopaty kompozytowej wirnika nośnego śmigłowca. Zagadnienia te są bardzo ważne, a poziom opisów zastosowanych metod oraz osiągniętych wyników jest na tyle szczegółowy że pracę można uznać za ważną z punktu widzenia naukowego.

4. Naukowość i oryginalność pracy

Zaproponowana przez Autora metodologia badawcza opiera się na klasycznym podejściu do projektowania konstrukcji kompozytowych, zaczynając od sformułowania specyfikacji (wymagań konstrukcyjnych), poprzez projektowanie geometrii konstrukcji, modelowanie i symulacje własności, badania materiałów, badania elementów składowych konstrukcji, dobór technologii wytwarzania (z uwzględnieniem możliwości ich realizacji w warunkach małych i średnich firm), a kończąc na badaniach kwalifikacyjnych gotowego wyrobu. Większość stosowanych metod badawczych ma charakter inżynierski i jest powszechnie stosowany w pracach konstrukcyjnych, wiele z zastosowanych metod jest znormalizowanych. Opisy zastosowanych metod są szczegółowe, a zalety i wady tych metod są przedyskutowane, na tyle szczegółowo, że czytający może wnioskować o ich poprawnym zastosowaniu.

Z punktu widzenia naukowości prace oceniam pozytywnie, wprawdzie mało jest w niej treści naukowych, w większości praca ma charakter badawczo - wdrożeniowy.

Praca jest zakończona na poziomie gotowości technologicznej TRL6, nie jest, w treści pracy dyskutowane jak osiągnąć gotowość do wdrożenia produkcji TRL9. Nie ma również informacji czy zaproponowany proces udało się wdrożyć małej i średniej firmie.

Podsumowując merytoryczną ocenę, naukowości i aktualności tematyki rozprawy doktorskiej uważam, że praca jest realizowana w aktualnej tematyce badań nad nowymi konstrukcjami łopat kompozytowych wirnika nośnego śmigłowców, a podjęcie tematu rozprawy oceniam pozytywnie. Natomiast naukowość pracy oceniam pozytywnie, spełnia ona w minimalnym stopniu wymagania stawiane pracom doktorskim.

Tematykę pracy można zaliczyć do dziedziny Inżynieria Mechaniczna.

5. Mocne i słabe strony pracy

Mocne strony pracy:

- Opracowana procedura projektowania i wytwarzania łopaty jest kompletna i może być bezpośrednio wykorzystana do budowy łopaty wirnika nośnego śmigłowca,
- Interdyscyplinarność pracy, która zawiera elementy prac analitycznych, modelowania numerycznego i symulacji własności modeli, wytworzenie prototypu i badań eksperymentalnych w zakresie badań własności statycznych i dynamicznych.
- Poprawne sformułowanie problemu badawczego i tezy pracy, która moim zdaniem jest ciekawa bo praca dedykowana jest dla konkretnego odbiorcy.
- Autor przedstawił bardzo szczegółową analizę czynników wpływających na ograniczenia we własnościach aerodynamicznych konstrukcji łopat wynikające z faktu, że łopata wykonana jest z kompozytów.
- Autor bardzo szczegółowo opisuje procedury badania materiałów, co ułatwia bezpośrednio wdrożenie wyników pracy w praktyce.
- Przeprowadzenie dynamicznych badań walidacyjnych opracowanej i wykonanej łopaty.
- Dedykowanie opracowanej procedury małym i średnim firmom.

Słabe strony pracy:

- Prace dedykowana jest opracowaniu technologii projektowania i wytwarzania łopat wirnika nośnego śmigłowców, który przystosowany jest do wdrożenia w małych i średnich firmach. Po pierwsze Autor nie przedstawił jakie metody stosują duże firmy i jaka jest ich przewaga nad zaproponowaną metodą. Utrudnia to ocenę unikalności osiągniętych wyników.
- Praca jest zakończona na poziomie gotowości technologicznej TRL 6, brak jest zupełnie przedstawienia koncepcji dojścia do wdrożenia do produkcji, czyli do TRL 9. Brak jest informacji czy metoda została wdrożona w praktyce małej lub średniej firmy.
- W paragrafie 4.2 Autor zestawia wymagania konstrukcyjne dla projektowanej łopaty, nie podaje z czego one wynikają, ani nie uzasadnia tych wymagań oraz nie dyskutuje jak sformułowane wymagania wpływają na sposób realizacji pracy doktorskiej.
- Autor opisując wymagania konstrukcyjne w jednym zdaniu używa pojęć sztywności skrętnej układu oraz sztywności układu sterowania; oba pojęcia sztywności opisują zupełnie różne wielkości i należałoby je rozdzielić.
- Wzory stosowane w pracy, są najczęściej podstawowymi wzorami zaczerpniętymi z literatury, nie są one autorskimi osiągnięciami Autora. Brak jest w pracy źródeł tych wzorów, jak również wzory nie są numerowane. Stąd ocena czy są do nich odwołania w tekście jest utrudniona.
- W rozdziale 6 Autor przedstawia kryteria wyboru materiałów na konstrukcje łopat bez uzasadnienia, nie wiadomo, czy wybór ten wynika z wyników przeprowadzonych badań, czy z doświadczeń Autora. W wielu przypadkach wybór ten jest dokonany arbitralnie bez uzasadnienia.

- Konstrukcja wirnika jest wielomateriałowa, wynikają z tego bardzo rygorystyczne ograniczenia konstrukcyjne wynikające np. z różnej rozszerzalności cieplnej, różnej sztywności, itp. Autor nie dyskutuje tego problemu w pracy.
- Autor ogranicza wszystkie sugerowane obliczenia do modeli liniowych. We współczesnych konstrukcjach lotniczych stosuje się modele nieliniowe, które w bardziej precyzyjny sposób opisują własności konstrukcji, w szczególności konstrukcji kompozytowych. Autor nie wyjaśnia dlaczego można wykorzystywać modele liniowe, a wyniki ich analiz można wykorzystać w projektowaniu krytycznych elementów konstrukcji lotniczych w praktyce.
- W badaniach temperatury zeszklenia osnowy kompozytu (Rozdział 6.2.3) zastosowano statystyczne kryterium akceptacji, Autor nie podaje jaką populację próbek zbadał co utrudnia ocenę poprawności wyników.
- W rozdziale 7.1 Autor zaleca stosowanie obserwacji wizualnej dla oceny porowatości kompozytu, dla którego dopuszczalna wartość wynosi 2% porowatości na 95% powierzchni. Autor nie podaje, czy dokonał walidacji takiego podejścia i czy ono jest skuteczne.
- W akapicie zatytułowanym „Analiza wyników pierwszej próby technologicznej” Autor podaje szereg niedoskonałości wytworzonej struktury, są to według mnie subiektywne oceny nie poparte żadnymi testami lub pomiarami, a przynajmniej Autor nie zastosowanych metod oceny.
- W opisie modelu MES łopaty na stronie 98, Autor nie opisuje modelu kontaktu sworznia z tuleją, a zjawiska występujące w sferze kontaktu mają znaczący wpływ na zachowanie się całego układu. Autor stosuje wiele uproszczeń w modelu MES, nie uzasadniając ich, ani nie podając założeń przy jakich można je stosować (np. str. 123, 124)
- W opisie badań ultradźwiękowych Autor nie podał jakie sprzężenie pomiędzy głowicą a badanym elementem jest stosowane w badaniach elementów łopaty (str. 111 – 112)
- Na stronie 121 Autor podaje, że konstrukcja łopaty powinna być opracowana tak aby środki ciężkości odcinków łopaty mierzone wzdłuż cięciwy znajdowały się przed osią przekręceń. Moim zdaniem to stwierdzenie nie jest jasne, ani nie jest udowodnione w pracy.
- Na stronie 124 Autor podaje, że „istnieje teoria obliczeń zmęczeniowych na poziomie warstwy” nie podaje źródeł tego stwierdzenia.
- Autor w rozdziale 7 przedstawia kilka propozycji modyfikacji konstrukcji łopaty dla poprawienia jej własności, wszystkie one prowadzą do zwiększenia masy łopaty, choć minimalna masa jest jednym z kryterium optymalizacji. Brak jest dyskusji tego aspektu modyfikacji konstrukcji.
- W rozdziale 8 Autor przedstawia mapy kolorów, które są wizualizację stanu materiału łopaty, brak jest odniesienia do tego typu wizualizacji w tekście pracy. Autor generalnie nie dyskutuje z punktu widzenia własności fizycznych materiału wyników badań ultradźwiękowych.

- W opisie badań sztywności łopaty (str. 142) nie podano sposobu obciążenia łopaty.
- Na str. 144 Autor odnosi się do „rozkładu obliczonych sztywności giętych ” ale nie podaje jak je obliczono.
- Na stronie 146 i 157 Autor opisuje badania własności dynamicznych i podaje że stosuje czujniki przemieszczeń, a powinno być przyspieszeń.
- Autor w analizie wyników badań własności dynamicznych łopaty odnosi się jedynie do częstości własnych konstrukcji, zupełnie pomija postaci drgań, które wnoszą istotne elementy do tego typu analiz. Pominięcie postaci drgań w analizie (choć są one zwizualizowane na rys 89) własności dynamicznych powinno być szerzej skomentowane. Istnieją w literaturze opisane i stosowane obiektywne metody porównywania postaci drgań, które wnoszą bardzo istotne informacje o stanie konstrukcji, jak również umożliwiają porównanie ich własności.
- Wśród testów dynamicznych na stronie 162 wymieniono „badania nieniszczące”, wymaga to komentarza, klasyczne badanie nieniszczące nie są testami dynamicznymi.
- We wnioskach (str. 175) Autor odnosi się do próby dynamicznej nadobrotów” w pracy nie zauważyłem opisu takiej procedury badań.

6. Wniosek końcowy

Praca doktorska przedstawiona przez mgr inż. Konrada Kozaczuka, jej zawartość i forma wskazują na Jego wysoką wiedzę inżynierską w zakresie opracowywania i wdrażania procesu projektowania i wytwarzania kompozytowych łopat wirnika nośnego śmigłowca. Sposób realizacji pracy wskazuje na umiejętność Kandydata w posługiwaniu się narzędziami pracy współczesnego badacza oraz umiejętność skutecznego rozwiązywania zadań badawczych. Wszystkie wymienione wyżej zagadnienia rozważane w pracy można zaliczyć do dyscypliny naukowej Inżynieria Mechaniczna.

Podsumowując, uważam, że Autor w przedłożonej rozprawie poprawnie sformułował zadanie badawcze, jakim jest zaprojektowanie i wytworzenie łopat kompozytowych wirnika nośnego śmigłowca w warunkach małej lub średniej firmy.

Praca odpowiada warunkom stawianym, w Ustawie o Tytule Naukowym i Stopniach Naukowych, rozprawom doktorskim w zakresie nauk technicznych. **Wobec powyższego stawiam wniosek o dopuszczenie przedłożonej, przez mgr inż. Konrada Kozaczuka, rozprawy do publicznej obrony.**

