

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

Kraków 23. 12 .2021

**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. Większość treści pracy Autor zaczerpnął z raportów projektu zrealizowanego w Instytucie Lotnictwa, które mają charakter opisów technicznych, a nie tekstu pracy naukowej. Brak jest również informacji jaki udział Kandydata był w poszczególnych etapach projektu, to nie wynika z treści pracy, a wręcz Autor podkreśla, że prace wykonał zespół. Takie sformułowania i realizacja pracy, jest możliwa do zaakceptowania, o ile autor pracy doktorskiej wykorzysta wyniki zespołu do dyskusji uzyskanego rozwiązania i sformułowania wniosków lub też do sformułowania metody projektowania lub wytwarzania. Takich odniesień do wyników zespołów badawczych, biorących udział w projekcie, w pracy nie znalazłem.

W rozdziale 1 Autor dokonał przeglądu historycznych i współczesnych konstrukcji łopat, który podsumował na końcu rozdziału. Brak jest w tym podsumowaniu analizy krytycznej konstrukcji oraz motywacji podjęcia tematu, ze szczególnym wyjaśnieniem, które zadania w projektowaniu i wytwarzaniu łopat kompozytowych można uznać za problem naukowy, lub projektowy wymagający do rozwiązania zastosowania metod uważanych za naukowe. Przegląd literatury wykonany przez Autora jest bardzo ubogi, a cytowane pozycje literaturowe stosunkowo stare, co mogłoby sugerować, że w ostatnich latach nie prowadzono, żadnych badań w tym zakresie. Spis literatury jest ubogi, a cytowane pozycje nie posiadają pełnych danych bibliograficznych, np. poz. 10, poz. 11, poz. 12, itd. co utrudnia ich odszukanie. Dziwić może fakt, że Autor nie zacytował nawet swojej publikacji w znaczącym periodyku z zakresu konstrukcji lotniczych, pt. „Composite technology development based on helicopter rotor blades”, która tematycznie pokrywa się z pewnymi obszarami pracy.

Uważam, że cytowana literatura nie wyczerpuje obszaru badań i powinna być uzupełniona o współczesne prace prowadzone w wielu ośrodkach badawczych na świecie. W podsumowaniu dotyczącym istniejących konstrukcji łopat, Autor nie wykazał, że jego praca wnosi jakiś wkład w rozwój procesu projektowania i wytwarzania łopat kompozytowych wirnika głównego śmigłowców, a raczej sam sugeruje, że naśladuje znane w przemyśle rozwiązania.

## **2. Cel pracy i teza naukowa**

W rozdziale zatytułowanym Teza rozprawy Autor przedstawił tezę i cel pracy; „Celem pracy jest opracowanie i wdrożenie kompleksowej metody projektowania oraz opracowania technologii wykonania kompozytowych łopat wirnika nośnego śmigłowca ILX-27”.

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 łopaty kompozytowej.

Autor sformułował w sposób jawny tezę pracy, której brzmienie jest następujące: „Trzy główne możliwości technologii kompozytowych, a mianowicie;

- dobór materiałów,
  - wybór kierunku włókien zbrojenia oraz ilość warstw kompozytów,
  - wybór procesów technologicznych, utwardzanie i klejenie,
- umożliwiają uzyskanie optymalnego rozkładu sztywności, wytrzymałości doraźnej i zmęczeniowej, geometrii oraz jakości łopaty wirnika nośnego.

Teza pracy jest sformułowana poprawnie, natomiast opis jej dowodu uważam za niewystarczający. Opisy wpływu poszczególnych czynników na które ma wpływ projektant, są zbyt ogólnikowe i nie mają charakteru naukowego. Autor stwierdził, a nie udowodnił np. dobór materiałów. Nie pokazano porównania wyników realizacji badań dla innych materiałów, a materiał wybrano arbitralnie bez szczegółowego uzasadnienia.

Cała treść pracy jest podporządkowana realizacji celu pracy. Cel pracy został osiągnięty, bo powstała łopata wirnika nośnego śmigłowca o wymaganych własnościach. Jednak uważam, że opis procesu projektowania i wytwarzania jest zbyt ubogi, aby uznać, że praca ma charakter badań naukowych. Chodzi mi głównie o opis zastosowanych metod (np. metod badania kompozytów według norm ASTM), uzasadnienie ich stosowania w przypadku rozważanej konstrukcji, dobór parametrów badań (np. szybkość odkształcenia w badaniach wytrzymałościowych), analizę i dyskusję wyników oraz wnioski wynikające z zastosowania metody do rozwiązania danego problemu. Zamieszczone w pracy treści w wyżej wymienionych obszarach nie mają charakteru naukowego, mają charakter raportu z realizacji projektu inżynierskiego. W wielu opisach, studiujący rozprawę nie ma możliwości sprawdzenia poprawności uzyskanych rezultatów, ze względu na; ogólność zamieszczonych opisów lub ich nadmierne skrócenie.

### **3. Ważność i aktualność zagadnienia naukowego rozpatrywanego w pracy**

Praca dotyczy istotnego, z punktu widzenia praktycznego, procesu projektowania i wytwarzania łopat kompozytowych wirnika nośnego śmigłowca. Jak wynika z literatury oraz praktyki w tym zakresie, jest to zagadnienie istotne dla rozwoju konstrukcji śmigłowców. Prezentowana praca zawiera jednak jedynie listę metod, których zastosowanie jest wymagane do zaprojektowania i wytworzenia kompozytowych łopat wirnika nośnego śmigłowca. Opis proponowanych rozwiązań jest bardzo ograniczony, brak jest uzasadnienia wyboru zastosowanych metod, brak jest dyskusji wyników, brak jest odniesienia do stanu wiedzy, co jest niezbędnym elementem sformułowania pracy doktorskiej.

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, jednak poziom opisów zastosowanych metod oraz osiągniętych wyników jest niewystarczający, aby uznać pracę 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, a kończąc na badaniu 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 bardzo skromne, wręcz są one jedynie wymienione, bez dyskusji o ich stosowalności lub oceny poprawności osiągniętych rezultatów. Wyniki modelowania i symulacji są przedstawione w postaci wykresów i tabel, bez dyskusji i analizy, w szczególności oceny ich jakości.

Z punktu widzenia naukowości prace oceniam negatywnie, mało jest w niej treści naukowych. Praca ma charakter skróconego raportu z przebiegu projektu. Większość wyników ma charakter odtwórczy i nie wnosi nowych elementów wiedzy do procesu konstruowania i wytwarzania kompozytowych łopat wirnika nośnego śmigłowca. Z treści pracy nie wynika co jest osiągnięciem Autora, a co innych członków zespołu. Większość wyników jest przedstawiana za sprawozdaniami z realizacji projektu w ILOT, Autor bardzo często powołuje się na te raporty, nie podając swojej roli w prezentowanych wynikach realizacji projektu.

Podsumowując merytoryczną ocenę, naukowości i aktualności tematyki rozprawy doktorskiej uważam, że praca jest realizowana w aktualnej tematyce badan nad nowymi konstrukcjami łopat kompozytowych wirnika nośnego śmigłowców, a podjęcie tematu rozprawy oceniam pozytywnie. Natomiast naukowość pracy oceniam negatywnie, ponieważ brak jest w niej charakterystycznych dla tekstów naukowych treści jak odniesienie wyników do wyników publikowanych w literaturze, opisów i dyskusji stosowanych metod badawczych i uzasadnienie ich wyboru, dyskusji osiągniętych wyników i ocena ich poprawności, opis stosowanych modeli oraz analizy ich stosowalności do rozwiązywanych problemów.

Tematykę pracy można zaliczyć do dziedziny Inżynieria Mechaniczna.

## **5. Mocne i słabe strony pracy**

Mocne strony pracy:

- Wykonanie łopaty kompozytowej wirnika nośnego śmigłowca spełniającej przyjęte założenia,
- Interdyscyplinarność pracy, która zawiera elementy prac analitycznych, modelowania numerycznego i symulacji własności modeli, badań eksperymentalnych w zakresie badań własności statycznych i dynamicznych.
- Poprawne sformułowanie problemu badawczego i tezy pracy.
- Przeprowadzenie dynamicznych badań walidacyjnych opracowanej i wykonanej łopaty.

Słabe strony pracy:

- Bardzo ubogi spis literatury cytowanej w pracy, składający się z 39 pozycji w tym 13 pozycji to raporty niepublikowane z realizacji projektu badawczego w ILOT. Pozycje literatury w większości stare.

- Brak przeglądu osiągnięć międzynarodowych w zakresie doskonalenia procesów projektowania i wytwarzania kompozytowych łopat wirników nośnych śmigłowców, w zasadzie przegląd koncentruje się na jednym projekcie realizowanym w jednostce naukowej w której zatrudniony jest Autor pracy. Utrudnia to ocenę unikalności osiągniętych wyników.
- Brakuje w pracy krytycznej analizy dostępnych publikacji w obszarze zainteresowań Kandydata, większość cytowanych prac jest jedynie wymieniona i ogólnie skomentowana, bez poddania tych prac szczegółowej krytycznej analizie.
- Autor, prezentując wyniki modelowania i symulacji, jak również większości wyników badań eksperymentalnych, powołuje się na raporty z projektu badawczego realizowanego w ILOT, nie podaje jaki jest jego udział w przedstawianych wynikach badań. Trudno jest więc ocenić czy wyniki osiągnięte przez Kandydata są oryginalnymi wynikami uzyskanymi przez niego, czy są wynikami innych badaczy uczestniczących w projekcie.
- Brak jest analizy cytowanej literatury w kontekście motywacji podjęcia tematyki pracy doktorskiej.
- Na stronie 35 Autor powołuje się na informacje prasowe (???) dotyczące zwiększenia resursów łopaty trzykrotnie, brak jest źródła informacji. Czy informacje prasowe można traktować jako wiarygodne źródło informacji naukowych w dziedzinie projektowania kompozytowych łopat wirnika nośnego śmigłowca.
- Na stronie 39 Autor podaje schemat procesu realizacji prac projektowych w procesie projektowania i wytwarzania łopaty wirnika nośnego śmigłowca. Na schemacie tym brak jest etapu akceptacji materiału, który jest opisany w tekście pracy. Dlaczego etap doboru materiału jest traktowany przez Autora jako niezależny proces (rys. 31)
- Na stronie 41 Autor podaje, że zadanie definiowania wymagań technicznych dla nowej łopaty zostało wykonane przez zespół biura konstrukcyjnego Centrum Nowych Technologii Instytutu Lotnictwa, nie podaje jak jest jego rola w realizacji zadania. (uwaga dotyczy również stwierdzenia na stronie 45).
- 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.
- W paragrafie 6.1 Autor uzasadnia wybór materiałów na konstrukcję łopaty kompozytowej praktykami stosowanymi przez dużych producentów. Takie uzasadnienie wyboru materiałów nie ma cech badań naukowych.
- W paragrafie 6.2.1 Autor opisuje proces kwalifikacji tkaniny z zastosowaniem badań opisanych w pozycji literatury [26] (niepublikowany raport ILOT). Z treści nie można stwierdzić jaką metodę zastosował Autor do kwalifikacji tkaniny i jakie są kryteria tej kwalifikacji.
- Na stronie 57 oraz 63 Autor powołuje się na przeprowadzone analizy statystyczne (np. analiza powtarzalności wyników) oparte o zbiory sześciu lub trzech danych. Wnioski z badań statystycznych na tak małych populacjach nie są wiarygodne.

- Na stronie 57 Autor podaje współczynnik populacyjny za raportem z projektu ILOT (niepublikowanym), wymaga to wyjaśnienia oraz podania metodyki ustalania wartości takiego współczynnika.
- Na stronie 59 Autor opisuje sposób interpretacji wyników analiz wytrzymałościowych kompozytów odnosząc je do wyników pomiaru naprężeń, nie wyjaśnia jak zmierzyć te naprężenia.
- Na stronie 60 Autor podaje, że na podstawie pozyskanych danych ustala się kryteria akceptacji wyrobu, nie podaje sposobu ustalania tych kryteriów.
- Na stronie 65 Autor powołuje się na akceptowalny poziom jakości wyrobu, nie podaje jaki jest to poziom i jak się go mierzy.
- W tabelach 13, 14 i 15 Autor przedstawia próby technologiczne kolejnych wersji konstrukcji łopaty. Przedstawiono zdjęcia szczegółów wykonanego prototypu oraz podsumowano jakość wykonania (w kolumnie 2). Nie podano jak stwierdzono, która wersja wykonania poszczególnych detali łopaty jest akceptowalna, a która nie. Czy do oceny akceptowalności posłużyła tylko obserwacja wizualna i czy to wystarcza do zaakceptowania poprawności wykonania elementów łopaty? Czy wizualna obserwacja wystarcza do oceny porowatości? Autor, moim zdaniem bezkrytycznie, stosuje obserwację wizualną do oceny jakości wykonania łopaty, nie analizuje prawdopodobieństwa wykrycia uszkodzenia (błędu wykonawczego) określanego wskaźnikiem PoD (Probability of Detection)
- W tabeli 17 przedstawiono wyniki próby technologicznej wykonania dźwigara, przedstawiono jedynie spis możliwych do wystąpienia błędów, opis tej próby jest zupełnie nie kompatybilny z opisem wcześniejszych prób
- W tabeli 18 i 19 przedstawiono wyniki wizualnej obserwacji przekrojów dźwigara, stwierdzono wizualnie znaczną porowatość (???) i stwierdzono, że proces technologiczny wykonania dźwigara jest poprawny. Autor nie podał jaka porowatość struktury dźwigara jest dopuszczalna, czy obowiązują ogólne standardy dla kompozytowych konstrukcji lotniczych.
- Na stronie 82 Autor podaje że pokrycie łopaty poddano badaniom nieniszczącym, nie wskazuje jakie badania nieniszczące wykonano i jakie są ich wyniki.
- Paragraf 7.2.1 jest sformułowany bardzo ogólnie, Autor pomija opisy poszczególnych czynności technologicznych, podaje jedynie jak usuwać problemy, które mogą wystąpić w czasie procesu wykonania wybranych elementów łopaty. Moim zdaniem ta część pracy ma pewną wartość naukową, pod warunkiem, że opisy i analizy poszczególnych będą bardziej szczegółowe i uzasadnione w sposób naukowy.
- Na stronie 83 Autor podaje, że zastosowano badania nieniszczące od oceny wykonanej nasady łopaty. Nie podaje jakie badania nieniszczące, ani nie pokazuje wyników tych badań.
- Na stronie 85 przedstawiono wyniki badań niszczących, nie opisano jak dokonano przecięcia elementów łopaty na przekroje. Sam proces cięcia mógł wprowadzić uszkodzenia w przekrojach, jak tego uniknięto?

- W paragrafie 7.3 Autor podaje dane wejściowe do projektu technicznego łopaty, są one podane bardzo ogólnie i na ich podstawie projekt łopaty nie może zostać wykonany. Autor powinien podać konkretne dane oraz źródła tych danych. Powinien również skomentować przedstawione dane i wymagania. Dla wymagań powinny być podane źródła ograniczeń konstrukcyjnych tak aby można było uznać je za wiarygodne.
- Na stronie 88 Autor poświęca flatterowi kilka zdań. Według mnie zagadnienie flatteru jest na tyle istotne w projektowaniu łopat kompozytowych, że w pracy powinna być pokazana jaką analizę flatterową Autor wykonał dla projektowanej łopaty.
- W paragrafie 7.3.2 Autor przedstawia algorytm (w postaci schematu blokowego) realizacji projektu technicznego. Autor nie opisał poszczególnych kroków tego algorytmu, nie opisał co jest na wejściu danego etapu ani co jest wynikiem danego etapu. Schemat blokowy, aby miał jakąś wartość dla treści pracy musi być uzupełniony o szczegółowy opis.
- W paragrafie 7.3.4 Autor podaje, że osiągnięto pozytywne marginesy bezpieczeństwa (brak definicji lub podania źródła), nie podaje jak duże są te marginesy i jaki mają wpływ na masę łopaty i położenia środka masy łopaty. Wyniki badań wytrzymałościowych odnoszone są do wartości dopuszczalnych, nie podano jakie są wartości dopuszczalne.
- Brak jest odwołania w tekście do rysunków 48 i 49.
- Na stronie 93 Autor stwierdza, że powiększona sztywność skrętna zmniejsza ryzyko flatterów łopaty. Stwierdzenie to wymaga uzasadnienia.
- W paragrafie 7.3.5 Autor analizuje sztywność łopaty, analizy te powinny być, moim zdaniem uzupełnione o analizę wrażliwości, które elementy konstrukcyjne mają największy wpływ na sztywność.
- Na stronie 94 Autor podaje „pożądany rozkład środka ciężkości łopaty”, nie wyjaśnia co to oznacza.
- W paragrafie 7.3.7 Autor opisuje proces optymalizacji konstrukcji łopaty w sposób bardzo skrótowy i pobieżny. Opisując proces optymalizacji należy podać kryteria optymalizacji, zmienne projektowe oraz dobrą metodę optymalizacji, która doprowadzi do rozwiązania globalnego, a nie jednego z rozwiązań lokalnych.
- W paragrafie 7.3.8 Autor podał, że przeprowadzono analizę drgań własnych łopaty, nie podał jaką metodą to wykonano, jakie są wyniki tych analiz. Z punktu widzenia własności dynamicznych oraz analiz flatterowych wyniki te są bardzo istotne i bez ich podania studiujący pracę nie jest w stanie ocenić poprawności konstrukcji.
- Na stronie 97 Autor podaje, że prototyp łopaty przebadano metodą ultradźwiękową, nie podano jaką, nie zaprezentowano wyników.
- Na stronie 99 Autor podaje, że wykonano pomiar sztywności oraz badania rezonansowe, nie podaje ani metodyki tych badań, ani wyników, przez co nie ma możliwości stwierdzenia poprawności tych testów.
- W rozdziale 10.2.3 Autor opisuje wyniki pomiarów uproszczonej biegunowej, nie podaje definicji tej wielkości, nie opisuje metodyki pomiaru, ani stanowiska

badawczego. Przy takim opisie trudno jest ocenić poprawność przedstawionych wyników.

- We wnioskach na stronie 114 Autor podaje, że określenie rewersu łopaty wymagać będzie dodatkowych badań, nie opisuje metodyki tych badań, oraz przyczyny, dla której nie wykonano tych badań w ramach pracy. Wręcz we wnioskach (wniosek 7 na stronie 115) podaje, że określenie rewersów wymagać będzie eksploatacji nadzorowanej. Natomiast we wniosku 8 na stronie 115 podano, że określenie rewersów będzie wymagało przeprowadzenia badań zmęczeniowych materiałów kompozytowych i elementów konstrukcyjnych łopaty. Moim zdaniem stwierdzenia te nie są spójne.
- Wniosek 3 na stronie 115 dotyczy powtarzalności własności łopat, w pracy Autor nie zajmuje się problemem powtarzalności wytwarzanych łopat

## 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. Natomiast sposób realizacji pracy nie wskazuje na umiejętność posługiwania 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 badawczego, jakim jest zaprojektowanie i wytworzenie łopat kompozytowych wirnika nośnego śmigłowca. Natomiast przedstawione rozwiązanie budzi moje zastrzeżenia co do jego naukowości i unikalności. Przedstawiony przez Kandydata tekst rozprawy ma charakter bardziej sprawozdania z projektu inżynierskiego, jak rozprawy naukowej.

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

Uważam również, że materiał badawczy zgromadzony przez Kandydata, potencjalnie mógłby posłużyć do przygotowania rozprawy, jednak wymaga to gruntownego przerehabilitowania i przeprowadzenia analiz zasugerowanych w mojej recenzji.

