

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

Kraków 08.10 .2021

**Opinia o pracy doktorskiej pt. "Opracowanie metodyki badań nieniszczących właściwej do wykrycia i oceny porowatości w kompozycie węglowym"**  
autorstwa mgr inż. Rafał Szymański.

**1. Zagadnienie naukowe rozważone w rozprawie**

W pracy doktorskiej Autor podjął bardzo ważny, z punktu widzenia praktycznego, problem oceny porowatości kompozytu węglowego, w szczególności stosowanego w pierwszorzędowych strukturach lotniczych. Występowanie porowatości w strukturach lotniczych jest niedopuszczalne jeśli przekraczają 2% (według dyrektyw FAA zalecane jest aby zawartość porowatości była mniejsza jak 0,5%) objętości kompozytu. W szczególności jest to trudne do uzyskania jeśli do produkcji stosuje się bezautoklawową metodę wytwarzania. Metoda ta jest bardzo często wykorzystywana ze względu na stosunkowo niższe koszty inwestycji i łatwość realizacji procesu. Z drugiej strony porowatości mogą być przyczyną nukleacji pęknięć lub delaminacji kompozytu, przez co struktura traci możliwość przenoszenia założonych obciążeń i może doprowadzić do uszkodzenia struktury w szczególności dla konstrukcji obciążanych dynamicznie. Porowatość kompozytów jest generalnie trudna do wykrycia metodami nieniszczącymi, powszechnie stosowanymi do badania konstrukcji lotniczych. Metody laboratoryjne porównanie gęstości wyznaczonej metodą Archimedesza z gęstością rzeczywistą, wypalanie osnowy, trawienie matrycowe są dokładne jednak niepraktyczne do badania porowatości elementów struktur kompozytowych samolotów. Również metoda tomografii komputerowej wymaga zastosowania drogiej aparatury o ograniczonej objętości. Z powyższych względów dobór metody pozwalającej na obiektywne badania porowatości w kompozytowych strukturach lotniczych jest bardzo istotny z praktycznego punktu widzenia. Autor wykonał studium porównawcze wybranej metody ultradźwiękowej z tomografią komputerową opartą o promieniowanie rentgenowskie. Tak

postawione zadania badawcze Autor skutecznie rozwiązał w ramach prezentowanej rozprawy doktorskiej.

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

We wstępie do pracy w podrozdziale cel pracy na stronie 24 Autor definiuje cel pracy jako „...opracowanie algorytmu ( w sensie ciągu zdefiniowanych czynności prowadzących do rozwiązania postawionego problemu), badania metodą ultradźwiękową kompozytów węglowych, umożliwiające wykrycie i ilościową ocenę porowatości w lotniczych strukturach kompozytowych...”. Z założenia poczynionego przez Autora algorytm powinien być uniwersalny (stosowalny do różnych materiałów i struktur kompozytowych). W pracy badania porównawcze Autor ogranicza do jednego typu struktury kompozytowej. Powyższy cel jest dobrze zdefiniowanym zagadnieniem badawczym, ponieważ definiuje obszar badań oraz szczegółowo wskazuje na założenia, dla których ma być opracowany algorytm badania porowatości kompozytów.

Autor sformułował w sposób jawny tezę pracy, która brzmi następująco; „Ilościowa i jakościowa ocena porowatości w strukturach kompozytowych jest możliwa za pomocą badań ultradźwiękowych poprzez odczyt wartości amplitudy echa dna, pod warunkiem uzyskania odpowiednio wysokiej korelacji z wartością porowatości wyznaczoną metodą tomografii komputerowej”.

Teza ta składa się z dwóch części, pierwszej która jest istotnie tezą naukową skutecznie udowodnioną w pracy przez Autora oraz drugiej, która definiuje warunki, dla których Autor będzie udowadniał prawdziwość postawionej tezy.

Cała treść pracy jest podporządkowana realizacji celu oraz udowodnieniu postawionej tezy poprzez wykonanie badań porównawczych metody ultradźwiękowej i tomografii komputerowej dla wykrywania porowatości lotniczych struktur kompozytowych.

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

Praca dotyczy istotnego, z punktu widzenia szeroko pojętej problematyki rozwoju zastosowania lotniczych konstrukcji kompozytowych. Jak wynika z literatury oraz praktyki w

tym zakresie, jest to zagadnienie istotne dla zapewnienia bezpieczeństwa eksploatacji statków powietrznych oraz ograniczenia kosztów wytwarzania struktur kompozytowych dzięki możliwości zastosowania mokrej metody wytwarzania.

Bardzo istotne, z punktu widzenia aktualności zagadnienia naukowego, jest przeprowadzenie walidacji eksperymentalnej zaproponowanej metody badania porowatości kompozytów, dobór aparatury pomiarowej oraz jej ustawień, oraz metody interpretacji wyników pomiarów. Praca ma charakter pracy doświadczalnej.

Podsumowując ten aspekt oceny rozprawy należy stwierdzić, że praca dotyczy bardzo aktualnego problemu naukowego jakim jest opracowanie algorytmów wykrywania porowatości w lotniczych strukturach kompozytowych z włóknami węglowymi we wszystkich aspektach prac doświadczalnych.

#### **4. Naukowość i oryginalność pracy**

Zaproponowana przez Autora metodologia badawcza zawiera wszystkie elementy procesu badawczego charakterystyczne dla prac eksperymentalnych. Jest w niej przegląd istniejących metod badawczych (algorytmów) dla rozwiązania zdefiniowanego zadania badawczego, analiza narzędzi badawczych, które można zastosować do rozwiązania zadania, bardzo wnikliwa dyskusja przyjętych założeń i scenariuszy dla przeprowadzonych testów metody dla poszczególnych algorytmów oraz bardzo szczegółowa analiza uzyskanych rozwiązań oraz sformułowanie wniosków szczegółowych w postaci opracowania nowych algorytmów dedykowanych do wykrywania porowatości lotniczych struktur kompozytowych. Praca przedstawia gotowe rozwiązanie problemu łącznie z koniecznymi nastawami aparatury i opisem sposobu przeprowadzania badań.

Z punktu widzenia naukowości pracę można ocenić jako szczegółowe studium porównawcze metod wykrywania porowatości w kompozytowych strukturach lotniczych, w którym zaproponowaną metodę ultradźwiękową w różnych wariantach realizacji porównano z uznaną przez Autora za dokładną (referencyjną) metodą tomografii komputerowej. Jednym z aspektów naukowych pracy jest sformułowanie sposobów rozwiązywania szczegółowych problemów przeprowadzania eksperymentów metodami ultradźwiękowymi. Do tych problemów zaliczyć można dobór oprzyrządowania (str 115), interpretacji wyników badań (str 91), dobór nastaw aparatury badawczej (str 121). Pomimo, że zagadnienie

wykrywania porowatości kompozytów węglowych z osnową polimerową to zostało zdefiniowane stosunkowo dawno i wiele zespołów badawczych prowadziło prace w podobnym zakresie, to do dzisiaj stanowi ono wyzwanie naukowe w szczególności w aspekcie praktycznego badania krytycznych struktur lotniczych. Pokazane przez Autora w pracy wyniki są oryginalne. Spis literatury jest wyczerpujący i zwiera aktualne pozycje ściśle powiązane z tematyką pracy.

Podsumowując merytoryczną ocenę, naukowości i aktualności tematyki rozprawy doktorskiej uważam, że;

- Zdefiniowanie algorytmów dla wykrywania porowatości w kompozytowych strukturach lotniczych za pomocą badań ultradźwiękowych,
  - Analiza i modyfikacja istniejących algorytmów stosowanych w klasycznych aplikacjach metody ultradźwiękowej dla zastosowań w badaniu lotniczych struktur kompozytowych,
  - Badania porównawcze zaproponowanej metody ultradźwiękowej z zastosowaniem metody tomografii komputerowej,
  - Implementacja opracowanych algorytmów i ich wdrożenia w praktyce badania rzeczywistych konstrukcji kompozytowych,
- stanowią oryginalne elementy zadania naukowego mogącego być podstawą do nadania stopnia naukowego doktora nauk technicznych w dziedzinie Inżynieria Mechaniczna.

## **5. Mocne i słabe strony pracy**

### *Mocne strony pracy:*

- Opracowanie autorskich algorytmów dedykowanych do realizacji badań porowatości kompozytowych struktur lotniczych składających się z czynności badawczych związanych z doбором aparatury, dobrem oprzyrządowania, doбором nastaw aparatury, procedury interpretacji wyników pomiarów (klasyfikacji porowatości) oraz procedury walidacji wyników pomiarów.
- Przeprowadzenie, dla poszczególnych czynności sformułowanego algorytmu, ich eksperymentalnej walidacji poprzez przeprowadzenie badań porównawczych walidacyjnych oraz badań statystycznych wyników.

- Logiczna i czytelna struktura pracy z przedstawieniem schematów blokowych realizowanych czynności badawczych, dzięki czemu w bardzo szybki sposób można zweryfikować kompletność pracy i zakres przeprowadzonych badań.
- Doświadczalny charakter pracy oraz precyzyjne opisy przeprowadzonych eksperymentów, pozwalające ocenić ich poprawność.
- Wykonanie kompozytowego panelu kalibracyjnego i przeprowadzenie procesu kalibracji proponowanej metody.
- Opis typowych defektów wprowadzanych w procesie produkcyjnym kompozytu i szczegółowa analiza czynników powodujących powstanie tych defektów.
- Opracowanie gotowego do zastosowania systemu w postaci sprzętu i oprogramowania oraz procedur badawczych (aplikacyjność wyników pracy), co jest moim zdaniem najmocniejszą stroną przedstawionej pracy doktorskiej.

*Słabe strony pracy:*

- Zawężenie badań przeprowadzonych w pracy do wąskiej klasy materiałów kompozytowych.
- Przyjęcie metody tomografii komputerowej jako metody referencyjnej bez szczegółowej dyskusji jej wad, np. nie podano jaki algorytm jest zastosowany do wykrywania porowatości ze skanów realizowanych w metodzie tomografii komputerowej. W konsekwencji przyjęto w analizach porównawczych, że wyniki uzyskane metodą tomografii komputerowej nie zawierają niepewności.
- Autor pomija opisy wielu wyników badań powołując się sprawozdanie Instytutu Lotnictwa, jest to dla czytającego nieczytelne i niejasne. Autor powinien przynajmniej, w krótki sposób opisać zasadnicze wyniki i wnioski z nich płynące. Taki przykładem są wyniki badań wykonanych paneli testowych (str. 115), czy brak opisu technologii wycinania próbek (str. 117), który nie powodował delaminacji na ciętych brzegach.
- Na rysunku 15 (str.39) przedstawiono zdjęcia defektów wprowadzanych na etapie wytwarzania, nie podano jaką metodą wykryto te defekty.
- Na rysunku 16 (str.39) pominięto opis defektu oznaczonego literą F.
- Na stronie 46 Autor podaje „znaczący spadek odporności zmęczeniowej pośrednio przy zginaniu statycznym” Zdanie to nie jest jasne, gdyż zjawisko zmęczenia obserwuje się

przy obciążeniach dynamicznych a nie przy obciążeniach statycznych (wymaga to wyjaśnienia).

- Wyjaśnienia wymaga stwierdzenie (str.48) „wilgotność środowiska pracy – im wyższa wilgotność tym większa porowatość”.
- Na stronie 50 Autor podaje stwierdzenie „doświadczony inspektor jest w stanie określić rodzaj defektu”. Wymaga wyjaśnienia jakie cechy mierzonego sygnału ultradźwiękowego umożliwiają określenie rodzaju defektu.
- Na stronie 50 Autor podaje stwierdzenie, że technika puls – echo jest wystarczająco wrażliwa, aby zidentyfikować małe defekty rzędu milimetra co jest stwierdzeniem prawdziwym przy odpowiednim doborze długości fali i mocy generowanych ultradźwięków do czego Autor się nie odnosi.
- Uzasadnienia wymaga wniosek podany przez Autora na stronie 58, „czym większa anizotropia tym większe tłumienie”
- W rozdziale 3.4 Autor deklaruje badanie panelu kalibracyjnego metodą tomografii komputerowej, ale nie pokazuje wyników tego badania. Czytający ma trudność, aby ocenić czy panele kalibracyjne są wykonane poprawnie.
- Na stronie 87 Autor podaje przepis na dobór częstotliwości ultradźwięków zastosowanych do badań porowatości, podaje, że nie może być zbyt wysoka, ani zbyt niska, z tego nie wynika jaka musi być. Należałoby wyjaśnić jak praktycznie dobrać tę częstotliwość. Podobne pytanie nasuwa się studiując przepis na dobranie czułości w metodzie tomografii komputerowej
- Na str. 89 zdanie Do korelacji metody ultradźwiękowej.... jest niezrozumiałe i wymaga wyjaśnienia.
- Rozdzielczość przestrzenna metody ultradźwiękowej i tomografii komputerowej są zazwyczaj różne, dlatego też wyjaśnienia wymaga jak obliczano korelacje wyników obu metod (wyniki obu metod są zbiorami różnymi pod względem rozmiaru?)
- Na str. 105 przedstawiono zależność porowatości od współczynnika tłumienia, wyjaśnienia wymaga jak dla celów badania tej zależności wyznaczono porowatość.
- W rozdziale 3.10 Autor dyskutuje niepewności pomiarowe podaje, że błąd metody referencyjnej wynosi, według danych producenta 10%. Z rozważań wyciąga wnioski, że błąd metody ultradźwiękowej (badanej) jest mniejszy i mieści się w granicach -9% do +4%. Wymaga to wyjaśnienia.
- W wielu bardzo istotnych stwierdzeniach Autora, ważnych dla treści pracy, Autor odwołuje się do raportu Instytutu Lotnictwa [138] nie opisując wyników tam uzyskanych. Bardzo utrudnia to zrozumienie istotnych treści pracy.
- W rozdziale 4.5 Autor analizuje wyniki badania korelacji pomiędzy metodami referencyjną i metodą badaną, wyjaśnienia wymaga fakt, dlaczego obserwuje się niską korelację dla paneli kalibracyjnych(rys.80) ?
- Na str 139 Autor podaje, że wyniki badań za pomocą metody mikroskopii cyfrowej uśredniono dla dwóch przekrojów. Przeprowadzenie badań statystycznych dla dwóch przekrojów jest błędem i na podstawie takich wyników, nie można wyciągać wniosków.

## 6. Wniosek końcowy

Praca doktorska przedstawiona przez mgr inż. Rafała Szymańskiego, jej zawartość i forma wskazują na jego wysoką wiedzę merytoryczną w zakresie badań ultradźwiękowych oraz tomografii komputerowej struktur kompozytowych i umiejętności kandydata w zakresie prowadzenia prac eksperymentalnych i interpretacji wyników tych badań. Ponadto, sposób realizacji pracy wskazuje na umiejętność posługiwania się narzędziami pracy współczesnego badacza oraz umiejętność formułowania zadań badawczych i ich skutecznego rozwiązywania. Wszystkie wymienione wyżej zagadnienia rozważane w pracy można zaliczyć do dyscypliny naukowej Inżynieria Mechaniczna.

Podsumowując, uważam, że Autor w przedłożonej rozprawie poprawnie sformułował, opisał i rozwiązał oryginalne zadanie naukowe, jakim jest opracowanie algorytmów wykrywania porowatości kompozytowych struktur lotniczych za pomocą badań ultradźwiękowych.

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 Rafała Szymańskiego, rozprawy do publicznej obrony.

