

płk dr hab. inż. Krzysztof Dragan, prof. ITWL

Warszawa, 20.08.2024 r.

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych

ul. Ks. Bolesława 6

01-494 Warszawa

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Jacka Michała Grochowalskiego, na temat „ Detekcja nieciągłości w płytach wykonanych ze stopów niklowo-chromowych i aluminiowych z wykorzystaniem metody prądów wirowych oraz algorytmów sztucznej inteligencji.”

Podstawa:

Recenzja została opracowana na podstawie zlecenia przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie – doktora habilitowanego inż. Pawła Dworaka prof. ZUT - pismo nr WE.4200.227.2024 z dnia 24 czerwca 2024 r.

1.Ogólna i formalna charakterystyka pracy

Przedstawiona do oceny praca zawiera podejście do oceny wykrywalności uszkodzeń w materiałach wykonanych ze stopów niklowo - chromowych oraz aluminiowych za pomocą diagnostyki nieniszczącej w postaci metody prądów wirowych. Metoda ta jest coraz powszechniej stosowana w celu oceny integralności konstrukcji w materiałach przewodzących prąd elektryczny w tym o charakterze ferromagnetycznym oraz paramagnetycznym. Zastosowanie tej metody ma szczególnie znaczenie wszędzie tam, gdzie istotne jest wykrywanie uszkodzeń położonych pod powierzchnią lub w szczególności w elementach o złożonym kształcie, gdzie interpretacja wyników badań wykonanych metodą ultradźwiękową byłaby utrudniona lub wręcz niemożliwa. Metoda prądów wirowych ma też istotne znaczenie w badaniu konstrukcji lotniczych w szczególności w ocenie i wykrywaniu pęknięć zmęczeniowych, ubytków korozyjnych

czy zmian strukturalnych spowodowanych oddziaływaniem wysokich temperatur lub cykli zmęczeniowych. Autor podjął się w swojej pracy realizacji ciekawej tematyki związanej z oceną integralności struktury, mającej na celu charakteryzowanie i wyznaczenie wielkości uszkodzeń możliwych do wykrycia za pomocą metody prądów wirowych. Ciekawym elementem pracy jest przedstawienie nie tylko charakterystyki i sposobu wykonywania badań, ale również zaproponowanie czujnika pomiarowego oraz toru pomiarowego. Podkreślić należy opracowanie rozwiązania pomiarowego umożliwiającego wykonywanie badań w warunkach niebezpiecznych dla stosowania elementów zasilanych prądowo. Autor zwrócił również uwagę na problematykę możliwości oceny głębokości uszkodzenia i zastosował rozwiązania pozwalające na zwiększenie głębokości penetracji przez stosowanie kombinacji częstotliwości pomiarowych. Ponadto w celu wykonania analizy i oceny uzyskanych wyników, autor zastosował metody modelowania numerycznego poddane walidacji eksperymentem pomiarowym oraz wsparte metodami analitycznymi wykorzystującymi elementy uczenia maszynowego i analizy statystycznej. Całość przedstawionej pracy stanowi opisowe podsumowanie czterech załączonych do pracy artykułów w których doktorant jest współautorem, jak również udzielonego patentu związanego z opracowanym przetwornikiem pomiarowym do badania materiałów przewodzących oraz zgłoszeniami patentowymi konstrukcji przetwornika pomiarowego do badania metodą prądów wirowych.

Przedstawiona zatem do oceny praca jest dokonaniem obejmującym część analityczną jak również część praktyczną wspartą wynikami eksperymentalnymi, prowadzącymi do powstania użytecznych rozwiązań, które mogą być wdrożone do zastosowań przemysłowych. Pozwala to zatem na stwierdzenie, iż praca ma charakter badań stosowanych a przedstawione rozwiązanie będą mogły mieć wdrożenie w badaniach praktycznych.

Doktorant przedstawił do oceny pracę składającą się z 77 stron maszynopisu obejmujących opis pracy w tym: streszczenia w języku polskim i w języku angielskim, wykazu 4 artykułów naukowych stanowiących podstawę do przedstawionego dokonania, wykaz dodatkowych osiągnięć tematycznie związanych z realizowaniem rozprawy doktorskiej oraz pięć rozdziałów opisujących tematykę przedstawioną w załączonych artykułach wraz z podsumowaniem oraz wykaz literatury obejmujący 61 pozycji. Ponadto w skład pracy włączono również oświadczenie o wkładzie procentowym autorów przedstawionych publikacji oraz załączone kopie artykułów naukowych oraz patentu.

Poniżej przedstawiono krótką charakterystykę ocenianej pracy:

Rozdział pierwszy – w którym autor przedstawia krótkie wprowadzenie związane ze stosowaniem metod badań nieniszczących w różnych dziedzinach gospodarki i nauki. Autor dokonuje krótkiej charakterystyki różnych stosowanych metod badań nieniszczących w szczególności rozwijając metody elektromagnetyczne do których zalicza się również metoda prądów wirowych. W dalszej części rozdziału autor przedstawia zastosowanie badań metodą prądów wirowych do oceny niezawodności i bezpieczeństwa krytycznych instalacji wykonanych między innymi ze stopów niklu. Rozdział zawiera również finalne podsumowanie coraz większego zastosowania metod sztucznej inteligencji w szczególności w ocenie i analizie sygnałów diagnostycznych. Rozdział zamyka krótkie wprowadzenie do tematyki zaprezentowanej w pracy.

Rozdział drugi – zawiera cel i tezę pracy. Głównym celem pracy było opracowanie i udoskonalenie metody defektoskopii metodą prądów wirowych w celu zwiększenia prawdopodobieństwa wykrycia nieciągłości materiałowych przy zachowaniu niskiego prawdopodobieństwa wystąpienia fałszywych wskazań. Badania te wykonano na przygotowanych płytach ze stopów niklowo - chromowych i aluminiowych. Rozdział przedstawia również sposób w jakim realizowane były badania. Przedstawia w pierwszej kolejności opracowanie i wybór metody wzbudzenia prądów wirowych za pomocą specjalnych sond pomiarowych. W dalszej kolejności doprowadziło to do zaproponowania metody pomiarowej, pozwalającej na uzyskanie głębszej penetracji prądów wirowych w badanym materiale. W rozdziale przedstawiono również celowość wykonania symulacji numerycznych dla zaprojektowanych i wykorzystywanych przetworników prądowirowych, jak również podejście do oceny zarejestrowanych sygnałów w celu uzyskania odpowiednich charakterystyk sygnałowych. Charakterystyki te będą mogły być również poddane analizie za pomocą opracowanych algorytmów uczenia maszynowego.

W rozdziale została również przedstawiona teza pracy która brzmi w następujący sposób: *„Zastosowanie wybranych metod defektoskopii z wykorzystaniem metody prądów wirowych oraz algorytmów sztucznej inteligencji pozwala na zwiększenie skuteczności wykrycia i identyfikacji nieciągłości w płytach wykonanych ze stopów niklowo-chromowych i aluminiowych przy jednoczesnym skróceniu czasu inspekcji”*.

Autor stawia również następujące cele szczegółowe mające na celu udowodnienie postawionej tezy badawczej;

- Opracowanie i przetestowanie nowych przetworników prądowirowych (w tym wykorzystujących jako wzbudzenie magnesy trwałe);

- Opracowanie dwuwymiarowych oraz trójwymiarowych modeli przetworników w środowisku FEM, w celu porównania i weryfikacji wyników symulacji sygnałami otrzymanymi z pomiarów;
- Wybór i przystosowanie algorytmów cyfrowego przetwarzania sygnałów pozwalających na redukcję szumów;
- Opracowanie funkcji aproksymującej sygnały uzyskiwane z przetworników w celu poprawy parametrów mierzonych sygnałów (w tym ograniczenia wpływu szumów);
- Utworzenie bazy danych z wynikami przeprowadzonych symulacji numerycznych modelu przetwornika, przeznaczonej do uczenia algorytmu sztucznej inteligencji;
- Identyfikacja parametrów wad materiałowych za pomocą opracowanych modeli sztucznej inteligencji.

Rozdział trzeci – w rozdziale tym autor dokonuje przedstawienia niewielkich podstaw fizycznych metody prądów wirowych, wprowadzając jednocześnie do problematyki sterowania głębokością penetracji wzbudzonych sygnałów. Autor identyfikuje składniki i czynniki wpływające na możliwości sterowania zmianą głębokości penetracji na podstawie wzbudzonych sygnałów. W tym celu w dalszej części rozdziału autor przedstawia wykonane próbki w postaci płaskowników ze stopu aluminium oraz ze stopu niklowo-chromowego mającego nacięcia pozwalające na modelowanie występujących w materiale nieciągłości. Tak przedstawiony sposób modelowania nieciągłości jest przyjęty w tej metodzie w praktyce badawczej i przemysłowej. W rozdziale schematycznie przedstawiono rysunki oraz wartości tabelaryczne zastosowanych materiałów wraz z charakteryzowaniem występujących w nich wad. Wady te charakteryzują się różną głębokością oraz szerokością w celu korelowania opisu rejestrowanego sygnału pomiarowego. W dalszej części pracy autor dokonuje prezentacji przetworników prądowirowych pozwalających na wzbudzenie sygnału pomiarowego za pomocą magnesów trwałych oraz przetwornika różnicowego z cewkami wzbudzającymi. Opis obejmuje rysunki przetworników wraz z poglądowym schematem działania. Jednym z parametrów pozwalających na modelowanie głębokości wnikania metodą prądów wirowych jest częstotliwość. Autor przedstawia metodę wieloczęstotliwościową impulsową którą wykorzystuje do wzbudzenia sygnału pomiarowego. W pracy przedstawiono podstawy fizyczne takiej metody wraz z jej modyfikacją, pozwalającą na zwiększenie głębokości badania. Autor dokonuje opisu charakterystyki sygnałowej, jak również podejścia do normalizacji opisu sygnału co będzie podstawą do wykorzystania w dalszej analizie sygnałowej. Autor dokonuje również wprowadzenie do środowiska symulacyjnego metodą elementów

skończonych, syntetycznie przedstawiając sposób przygotowania i przeprowadzenia modelowania pozwalającego na uzyskanie przebiegów sygnałów pomiarowych do dalszej analityki porównawczej. Finalnie autor przedstawia algorytm k najbliższych sąsiadów który wykorzysta do oceny zarejestrowanych danych w celu odpowiedniej separacji wskaźników sygnałowych.

Rozdział czwarty – w rozdziale tym na podstawie przedstawionych spójnie dobranych tematycznie artykułów autor dokonuje syntezy uzyskanych wyników badań grupując je w obszary tematyczne.

W pierwszej części rozdziału autor przedstawia rozważania dotyczące analizy numerycznej czujnika prądowirowego z magnesami trwałymi. Autor przedstawia geometrię czujnika i modele numeryczne wzbudzonego pola oraz wyniki symulacji zarejestrowanych sygnałów dla poszczególnych składowych pola magnetycznego. Na podstawie zarejestrowanych wyników pomiarów, autor przedstawia metodologię wyznaczenia parametrów sygnałowych pozwalających na ocenę możliwości wykrycia uszkodzenia zalegającego na różnych głębokościach. Następnie autor przedstawia wynik badań eksperymentalnych pozwalających na korelowania uzyskanych wyników z przeprowadzoną symulacją numeryczną. Autor przedstawia schemat blokowy stworzonego układu pomiarowego oraz charakteryzuje i opisuje utworzony tor pomiarowy. Doktorant przedstawia i szczegółowo charakteryzuje wyznaczone charakterystyki pomiarowe sygnału, jak również przedstawia zależności pozwalające na opis funkcyjnych zależności rejestrowanego sygnału w celu oceny jego zmian w zależności od głębokości zlokalizowanego uszkodzenia. Na podstawie zarejestrowanych charakterystyk sygnałowych widać zmienność rejestrowanego sygnału w zależności od głębokości uszkodzenia, jak również od prędkości obrotowej wymuszenia generacji sygnału pomiarowego. Autor charakteryzuje i przedstawia w jaki sposób sygnały te zmieniają się w zależności od głębokości położenia wady co pozwala na tworzenie rejestrowanych charakterystyk wartości maksymalnych sygnału. Następnie charakterystyki tego sygnału są interpolowane, co pozwala na ocenę zmienności wartości tego sygnału, jak również określanie granic wartości nasycenia sygnału do oceny wpływu zmienności parametrów pomiarowych na rejestrowane dane.

W dalszej części pracy autor szczegółowo przedstawia opracowany przetwornik pomiarowy wykorzystujący ruch magnesów trwałych do generacji pola pomiarowego. Na tej podstawie autor przedstawia koncepcję i sposób uzyskiwania sygnałów pomiarowych oraz przedstawia charakterystyki wzbudzonego sygnału pomiarowego. W oparciu o wyniki i doświadczenia uzyskane z uprzednio przedstawionych pomiarów autor proponuje zmodyfikowaną metodę pomiarową, obejmującą

wieloczęstotliwościową generację pola pomiarowego. Metoda ta wykorzystuje wykorzystanie szeregu impulsów pomiarowych o zmiennych okresach przebiegów pozwalających na generowanie pola pomiarowego o większej energii. Ciekawym elementem tej pracy jest przedstawienie szeregu charakterystyk zarejestrowanych spektrogramów, przedstawiających generowany sygnał pomiarowy w zależności od rodzaju uszkodzenia, jak również parametrów wzbudzenia sygnału. Finalnie z uwagi na szereg zebranych danych autor proponuje wykorzystanie algorytmu k najbliższych sąsiadów dla metody wieloczęstotliwościowej w celu oceny możliwości automatycznej estymacji wielkości defektów rejestrowanych podczas badania. Opracowany algorytm identyfikuje szereg parametrów rejestrowanych między innymi ze spektrogramów jako tzw. predyktory, pozwalające na przeprowadzenie klasyfikacji poszczególnych grup głębokości położenia uszkodzenia. W rozdziale szczegółowo przedstawiono grupy predyktorów, oraz odpowiadające im parametry rejestrowane w trakcie wykonywania pomiarów. Przedstawiono metodologię normowania przestrzeni klasyfikacyjnej oraz szczegółowo omówiono uzyskane grupy klasyfikacyjne dla poszczególnych zestawów predyktorów w odniesieniu do głębokości położenia wady, jak również wartości odstające i wartości błędów. W rozdziale tym autor przedstawia finalnie tabelaryczne i graficzne wartości klasyfikowanych sygnałów oraz dokonuje ich porównania i syntetycznego omówienia.

Rozdział piąty – w którym autor dokonuje krótkiego podsumowania przeprowadzonych badań jak również odnosi się do uzyskanych wyników pozwalających na weryfikację postawionej tezy badawczej oraz szeregu celów szczegółowych.

2. Ocena tematu, celu i zakresu pracy

Przedstawiona do oceny praca zawiera sformułowany problem, postawioną tezę oraz cele badawcze. Przedstawione w dalszej części pracy badania oraz przeprowadzone analizy prowadzą do realizacji postawionych celów badawczych. Tematyka pracy jest związana z rosnącymi potrzebami diagnozowania i charakteryzowania materiałów stosowanych w budowie elementów konstrukcyjnych w których należy wykrywać uszkodzenia na jak najwcześniejszym etapie. Przedstawiony zakres pracy obejmuje szerokie spektrum prac badawczych począwszy od projektowania czujników i układów pomiarowych specjalizowanych do określonych badań, prowadząc przez realizację badań, charakteryzowanie sygnałów, określanie metodologii pomiaru z wykorzystaniem modelowania oraz szczegółowej analizy sygnałów. Autor oparł swoją pracę o przedstawione artykuły pomiarowe zawierające uporządkowany sposób przeprowadzania określonego wysiłku badawczego. Powoduje to jednak, że pewne

zagadnienia związane z przeglądem stosowanych metod badawczych, odniesieniem się do aktualnego stanu wiedzy, czy przedstawieniem i opisem uzyskanych wyników badań zostały potraktowane w pracy zbyt ogólnie. Co jest istotne praca wpisuje się w charakter nowoczesnych prac badawczych obejmujących interdyscyplinarny stan wiedzy oraz badania teoretyczne, badania eksperymentalne oraz prace programistyczne. Przedstawiony zakres pracy prowadzi ponadto przez identyfikację problemu, zaproponowanie rozwiązania oraz stworzenie narzędzi analitycznych pozwalających na jego opis w tym wykorzystując algorytmy uczenia maszynowego. Załączone do pracy patent i zgłoszenia patentowe świadczą o wysokim walorze praktycznym pracy a zaproponowane rozwiązania pomiarowe dla czujnika pomiarowego pozwalają na jego zastosowanie w pracach badawczych i użytkowych. Przedstawiona praca przedstawia logicznie połączony tok myślowy prowadzący do przedstawienia określonego rozwiązania problemu technicznego. Biorąc powyższe pod uwagę **uważam, iż podjęcie zaproponowanej tematyki jest celowe i użyteczne** a praca z uwagi na jej zakres obejmujący modelowanie i badania eksperymentalne ma walor użyteczny.

3. Ocena rozprawy

Przedstawiona do oceny praca obejmuje proces badawczy związany z opracowaniem metody diagnozowania określonych klas materiałów z wykorzystaniem metody prądów wirowych. Jest to metoda dla której pole pomiarowe jest zmienne i zależy nie tylko od parametrów wymuszenia które w pewien pseudo sposób kontrolują wartości np. głębokości pola pomiarowego, lecz również zależy od własności materiałowych badanych konstrukcji. Świadomość tego procesu jest widoczna w pracy. Doktorant przygotowując publikacje i pracę posłużył się narzędziami do przeprowadzenia procesu modelowania oraz przygotowania układu pomiarowego. Ponadto autor przygotował metodologię analizy zarejestrowanych sygnałów pomiarowych włącznie z wykorzystaniem metody klasyfikacyjnej pozwalającej na grupowanie uzyskanych wyników. Przedstawiona praca zawiera szereg elementów charakteryzujących świadomy i oparty na dobrze postawionych celach badawczych proces pomiarowy. Autor przeprowadza badania w oparciu o postawione założenia posługując się modelem. W oparciu o wyniki modelu waliduje jego wskazania na podstawie przeprowadzonego eksperymentu. Znajomość metody i jej ograniczeń jest widoczna w pracy, dlatego doktorant wykorzystuje wzbudzenie z pasmem częstotliwości w celu uzyskania większej energii sygnału oraz zwiększonej głębokości sygnału. Na uwagę zasługuje również część wprowadzająca interdyscyplinarny charakter pracy a mianowicie wykorzystanie metod uczenia maszynowego a konkretnie metod

klasyfikacji w oparciu o rejestrowane zbiory danych. Takie podejście pozwala na automatyzację procesów wnioskowania jak również określanie i walidowanie wskazań. Charakter pracy jest znaczący dla obecnych procesów eksploatacji z uwagi na coraz większe wykorzystanie metody prądów wirowych w szeregu gałęzi gospodarki i przemysłu i takich jak: energetyka, przemysł petrochemiczny, energetyka klasyczna i jądrowa, transport i przemysł lotniczy i kosmiczny. Wykorzystanie tej metody będzie miało również coraz większe znaczenie w przypadku diagnozowania konstrukcji i materiałów wykonanych metodą przyrostową. Z uwagi na połączenie tej pracy z cyklem załączonych artykułów nie sposób nie zauważyć również kilku czynników negatywnie wpływających na jej ocenę i takich jak brak szerszej dyskusji obecnego stanu wiedzy i odniesienia się do prowadzonych badań, stosowane skróty myślowe i pewne uproszczenia edycyjne wprowadzające lukę informacyjną podczas zapoznawania się z dokonaniem.

Jednakże, przedstawiona praca spełnia wymagania związane z wniesieniem oryginalnego rozwiązania postawionego procesu badawczego. Praca zawiera wszystkie niezbędne elementy samodzielnego procesu naukowego a jej wyniki stanowią, że ma charakter interdyscyplinarny a wyniki mogą być zastosowane w praktyce przemysłowej.

Do podstawowych zalet rozprawy pod względem opisu przedstawionego problemu, wyboru metod i zakresu badań oraz sposobu jego rozwiązania zaliczam:

- a) praktyczną tematykę rozprawy związaną z diagnozowaniem konstrukcji i materiałów z wykorzystaniem metody prądów wirowych;
- b) kompleksowe podejście do przygotowania procesu pomiarowego obejmującego identyfikację problemu oraz przygotowanie toru pomiarowego, przeprowadzenie modelowania i walidację pomiarową;
- c) opracowanie rozwiązań czujników pomiarowych pozwalających na pomiar z wykorzystaniem wzbudzenia wieloczęstotliwościowego;
- d) opracowanie wskaźników sygnałowych pozwalających na komparatywny charakter oceny wskazań od uszkodzeń;
- e) wykorzystanie automatyzacji klasyfikacji wyników w oparciu o metodę uczenia maszynowego;
- f) możliwość wykorzystania wyników do implementacji w rzeczywistych rozwiązaniach.

Z uwagi na odniesienie się pracy do cyklu załączonych publikacji praca nie jest wolna od wad do których zaliczam:

- a) brak szczegółowo przeprowadzonej analizy literaturowej dotyczącej prowadzonych badań i dostępnego stanu wiedzy;
- b) brak bardziej szczegółowych rozważań dotyczących wyboru metody klasyfikacji wskazań z wykorzystaniem metody uczenia maszynowego prowadzącego do uzasadnienia wybranej metody;
- c) brak odniesień literaturowych do przedstawionych zależności i wzorów matematycznych (np. str 20, 28, 29) i brak przedstawienia jednostek pomiarowych w układzie SI;
- d) brak przedstawionego dobrego wstępu teoretycznego do metody co wpływa na niejednoznaczne odnoszenie się do stwierdzeń związanych z przedstawioną metodą pomiarową np. w zakresie efektu naskórkowego czy nazewnictwa i sformułowań (np. czujnik prądowirowy a nie wiroprądowy).
- e) brak skali sygnałowych na przedstawianych rysunkach wpływających na brak możliwości komparatywnego odniesienia się do rejestrowanych wartości sygnałowych (np. rys. 2 str. 20)
- f) błędy stylistyczne i edycyjne
 - np. str 24 tytuł podrozdziału powinien brzmieć - ... ze wzbudzeniem magnesami trwałymi;
 - np. str. 42 ostatnie zdanie - „..... przeprowadzono także analizę wpływu głębokości wady na prędkość obrotową głowicy....” powinno mieć przedstawiony sztyk związany z zależnością tych wartości.
 - Stosowanie analogicznych symbolicznych oznaczeń dla różnych wartości fizycznych – np. określenie strumienia magnetycznego i średnicy uzwojenia Φ – patrz. str. 26 – Rys. 7 i tablica 3 str. 27.

Pytania i wątpliwości jakie pojawiły się podczas analizy niniejszej pracy są następujące:

1. Proszę o interpretację i wyjaśnienie rozumienia efektu naskórkowości przedstawionego w pracy.
2. W odniesieniu do tabeli nr 3 przedstawionej na str. 27 i zawierającej wartości liczby zwojów i (z przedstawionych jednostek jak można interpretować - średnicę uzwojenia), proszę o wyjaśnienie sposobu wyboru ilości zwojów oraz średnicy uzwojenia cewek wzbudzających i cewki pomiarowej.
3. Na str. 39 pod rysunkiem 18 pojawia się stwierdzenie, że zaproponowana konstrukcja przetwornika pozwala na wykrycie wad w grubych przewodzących płytach aluminiowych oraz umożliwia oszacowanie głębokości wad. W związku z powyższym proszę o odpowiedź na następujące pytania szczątkowe:

- a. Jaka maksymalna głębokość wady możemy wykryć za pomocą takiego przetwornika;
 - b. Jaki jest minimalny rozmiar takiej wady;
 - c. Jaka jest rozdzielczość metody pomiarowej – tzn. jakie zmiany w wielkości uszkodzenia i głębokości położenia możemy kwantyfikować;
 - d. W jaki sposób możemy szacować wielkość głębokości położenia wady i jej rozmiar jeżeli będziemy do badań mieć szereg materiałów w postaci stopów aluminium o wartości przewodności elektrycznej zmieniającej się od np. 25% IACS do 60 % IACS.
4. W odniesieniu do rysunku 21 przedstawionego na str. 42 proszę o skomentowanie z czego wynikają znaczące (nieliniowe) różnice dla gradientu napięcia dla płytko i głębiej położonych wad.
 5. Proszę o komentarz uzyskanych zerowych wartości funkcji straty dla danych symulacyjnych przedstawionych w tabeli 10 na str. 62.
 6. Czy na przykładzie uzyskanych wskazań sygnałowych znając krzywą danych interpolowanych możemy dla danego materiału i zakładanej wartości wielkości uszkodzenia oszacować głębokość uszkodzenia. Jaki byłby błąd szacowania takiej wielkości wskazania.
 7. Proszę o uzasadnienie wyboru metody klasyfikacji opartej o algorytm k najbliższych sąsiadów w odniesieniu do innych metod separacji danych np. PCA czy LDA.

Podsumowując powyższe, w pracach o złożonym charakterze trudno jest uniknąć pomyłek i nieścisłości. Uważam zatem, iż pomimo przedstawionych nieścisłości praca przedstawiona przez autora jest wartościowym i oryginalnym podejściem do wykorzystania metody prądów wirowych w diagnostyce materiałów.

4. Wniosek końcowy

Praca doktorska przedstawiona przez mgr inż. Jacka Michała Grochowalskiego oraz zawartość i forma pomimo przedstawionych nieścisłości wskazuje na jego wiedzę i doświadczenie w zakresie opracowania i walidowania metod badań nieniszczących na przykładzie metody prądów wirowych. Na podstawie przedstawionej pracy i załączonych artykułów w których jest współautorem uważam, iż doktorant umie samodzielnie przygotować i zrealizować rozwiązanie problemu naukowego na podstawie badań analitycznych i eksperymentalnych.

Podsumowując uważam, że poziom przedstawionej pracy **spełnia wymagania stawiane** rozprawom doktorskim w rozumieniu **art. 13 pkt 7 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2017 r., poz 1789) w związku z Art. 179, ust.1, Ustawy z dnia 3 lipca 2018 r., „Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym” (Dz.U. z 2018 r., poz 1669).**

W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Jacka Michała Grochowalskiego do publicznej obrony jego rozprawy.

