

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

Warszawa, 31.07.2024 r.

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych

ul. Ks. Bolesława 6

01-494 Warszawa

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Macieja Badory, n.t. „Metoda wyznaczania rozmiaru uszkodzenia elementów turbiny gazowej z wykorzystaniem algorytmów uczenia maszynowego, mająca zastosowanie na wczesnym etapie eksploatacji.”

Podstawa:

Recenzja została opracowana na podstawie zlecenia Sekretarza Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN – prof. dr hab. inż. Zbigniewa Ranachowskiego - pismo z dnia 29 kwietnia 2024 r.

1. Ogólna i formalna charakterystyka pracy

Przedstawiona do oceny praca zawiera interdyscyplinarną problematykę związaną z możliwością predykcji rozwoju i identyfikacji wielkości uszkodzeń dla komponentów turbin gazowych, jak również możliwości oceny zużycia tych elementów w trakcie eksploatacji. Dotychczasowe podejście w eksploatacji komponentów turbin gazowych związane było z koniecznością oceny ich stanu technicznego za pomocą przeglądów weryfikacyjnych lub pomiarów metodami nieinwazyjnymi. Jest to istotny element eksploatacji takich zespołów z uwagi na zapewnienie bezpieczeństwa eksploatacji jak również optymalizacji jej kosztów. Autor w przedstawionej pracy zaproponował wykorzystanie algorytmów uczenia maszynowego w celu realizacji dwóch głównych zagadnień eksploatacyjnych:

- Próbie oceny maksymalnej długości pęknięć zmęczeniowych występujących na łopatkach kierowniczych wysokiego ciśnienia turbiny gazowej;
- Próbie przewidywania redukcji grubości ścianki elementu łączącego komorę spalania z sekcją turbiny w wyniku utleniania.

W obydwu przypadkach mamy do czynienia z istotnym dla procesu eksploatacji zagadnieniem technicznym a przedstawiona praca pozwala na ocenę i identyfikację możliwości wykorzystania takich algorytmów na rzeczywistych obiektach. Autor przedstawia dane dotyczące parametrów zebranych za pomocą systemów kontrolno – pomiarowych dla turbin gazowych firmy Baker Hughes. Ciekawym i nowatorskim podejściem w pracy jest wykorzystanie modeli oceny wzrostu pęknięcia i erozji ścianki korpusu turbiny do wnioskowania w oparciu o sztuczne sieci neuronowe oparte o prawa fizyki (ang. Physics-Informed Neural Network, PINN). Jest to zaawansowane podejście łączące metody uczenia maszynowego z wiedzą z dziedziny fizyki zjawiska w celu modelowania i analizy złożonych procesów. Takie podejście jest szczególnie istotne w procesach diagnostycznych w których nie zawsze dysponuje się znaczną ilością danych – która pozwala na wnioskowanie (jak np. w metodach regresji). Co jest istotnym elementem tej pracy, autor pokazuje użyteczność takich metod w szczególności dla małej ilości danych zarejestrowanych podczas pracy urządzeń. Wykorzystanie takich sieci, stanowi również możliwość generalizacji rozwiązań dla różnych lokalizacji a nawet innych obiektów w celu oceny prawdopodobieństwa pojawiania się i rozwoju uszkodzenia. W pracy przedstawiono podejście do budowy modelu wnioskującego, przedstawiono proces konstruowania sieci, jak również proces uczenia i wnioskowania na różnych zestawach danych wraz z redukcją ich dostępności. Przedstawiona tematyka łączy modelowanie procesów uszkodzania, oceny sygnałów pomiarowych, przygotowania higienicznych danych do analizy oraz procesu wnioskowania. Takie zagadnienia z uwagi na coraz większe wykorzystanie możliwości implementacji obliczeniowych metod uczenia głębokiego, znajduje coraz większe zastosowanie w problematyce eksploatacyjnej urządzeń technicznych. Praca wpisuje się zatem w nurt nowoczesnych rozwiązań dla wsparcia użytkowania i oceny stanu technicznego urządzeń przemysłowych.

Autor przedstawił do oceny dokonanie obejmujące 165 stron maszynopisu, zawierające 7 rozdziałów, wykaz skrótów, streszczenie w języku polskim i angielskim, oraz bibliografię składającą się z 215 pozycji literaturowych.

Poniżej przedstawiono krótką charakterystykę pracy przedstawionej przez doktoranta.

Rozdział 1 – stanowi wstęp w ramach którego autor przedstawia problematykę jaką będzie realizował w trakcie pracy. Omawia podejście wykorzystujące algorytmy uczenia maszynowego w tym wykorzystanie sieci neuronowych opartych o prawa fizyki do modelowania procesów wykrywania uszkodzeń w dwóch technologicznych przypadkach. Są one związane z wykrywaniem pęknięć zmęczeniowych w łopatkę turbiny oraz zmian grubości ścianek elementu turbiny. W obydwu przypadkach przedstawione zostały podejścia umożliwiające modelowanie tych procesów w oparciu o mechanikę pęknięcia jak również modele termodynamiki przepływu gazów.

Rozdział 2 – przedstawia cele, tezę i zakres rozprawy. Celem badań było opracowanie metody wykorzystującej algorytmy uczenia maszynowego do przewidywania uszkodzeń w częściach turbin gazowych. Kluczowe założenia przyjęte przez autora są związane z wykorzystaniem modeli uwzględniających dane pozyskane z pomiarów i modele fizyczne opisujące proces mechaniczno-termodynamiczny cyklu pracy turbiny. W szczególności istotnym elementem pracy jest uniwersalność modelu w szczególności dla ograniczonej liczby danych. Jednym z istotnych celów pracy jest możliwość wykorzystania takich modeli dla różnych typów uszkodzeń. Ponadto zgodnie z obecnymi trendami projektowania i użytkowania maszyn wirnikowych (od kołyski do grobu) zbieranie, analizowanie oraz predykcja możliwości wystąpienia uszkodzenia, metodologia ta może mieć zastosowanie na różnych etapach eksploatacji komponentów, takich jak faza projektowania, testy początkowe czy rozpoczęcie eksploatacji.

Autor stawia następujące sformułowania tezy badawczej:

1. Modele oparte na algorytmach uczenia maszynowego mogą dokładnie przewidywać uszkodzenia w warunkach ograniczonych danych dla elementów turbin gazowych.
2. Modele akumulacji uszkodzeń (ang. DAM) oparte na uczeniu maszynowym mogą być skutecznie trenowane nawet przy bardzo małej liczbie danych.
3. Hybrydowe modele łączące uczenie maszynowe z wiedzą o procesach termomechanicznych mogą dokładnie określać proces powstawania i rozwoju uszkodzeń nawet przy niekompletnych zarejestrowanych danych operacyjnych.

W dalszej części rozdziału autor przedstawia strukturalny podział pracy na trzy główne części:

- Pierwsza część pracy dotyczy przewidywania długości pęknięć zmęczeniowych w na krawędziach natarcia łopatek pierwszego stopnia przy użyciu klasycznych algorytmów uczenia maszynowego na małym zbiorze danych (np. regresja liniowa i wielomianowa, i gradientowa). Szczegóły tych badań przedstawiono w rozdziale 4.
- Druga część pracy obejmuje użycie sztucznych sieci neuronowych opartych o prawa fizyki (ang. PINN). W szczególności ta część pracy obejmuje proces budowy sieci neuronowej pozwalającej na implementację modeli termodynamiczno-mechanicznych dla procesów propagacji pęknięć zmęczeniowych w określonych lokalizacjach na krawędzi natarcia łopaty. Obszar ten obejmuje połączenie danych empirycznych z modelem pracy. Szczegóły badań przedstawiono w rozdziale 5.
- Trzecia część pracy dotyczy modelowania redukcji grubości ścianek wskutek utleniania w elementach turbin gazowych. Część ta stanowi rozszerzenie implementacji metod analizy modeli termomechanicznych do procesu utleniania z wykorzystaniem sieci PINN. Istotnym i potwierdzającym tezę elementem jest wykorzystanie zbioru danych o małej

liczności do wnioskowania o zmianach grubości ocenianego elementu. Szczegóły badań przedstawiono w rozdziale 6.

Rozdział 3 – zawiera szczegółowy opis podejścia do procesu obsługi i użytkowania turbin gazowych. Autor identyfikuje i przedstawia szereg parametrów opisujących proces eksploatacji turbin gazowych, jak również co istotne identyfikuje szereg parametrów wpływających na ten proces. W rozdziale przedstawiono również istotne składowe wpływające na proces powstawania uszkodzenia, które pozwalają na tworzenie modelu fizycznego propagacji uszkodzenia w strukturze łopatek turbiny gazowej jak również grubości ścianek turbiny podlegających kontroli.

Do tych składowych należy zaliczyć:

- Cykle termomechaniczne;
- Utlenianie pokryw termo- barierowych;
- Deformacje plastyczne wskutek procesu pełzania;
- Korozja wskutek zanieczyszczeń w paliwie.

Rozdział przedstawia również empiryczny model powstawania uszkodzenia uwzględniający rozkład prawdopodobieństwa powstania uszkodzenia o różnej fenomenologii. Rozdział zawiera również wprowadzenie zarówno do metod uczenia maszynowego w celu predykcji uszkodzeń jak również sztucznych sieci neuronowych opartych o prawa fizyki. Finalnie istotnym elementem rozdziału jest omówienie metodologii tzw. transferu wiedzy polegającego na wykorzystaniu modelu wiedzy opracowanego na konkretnym zagadnieniu fizycznym w odniesieniu do wnioskowania na zbliżonych zagadnieniach. Autor charakteryzuje i przedstawia te zagadnienie w szczególności identyfikując możliwe rozwiązania do wykorzystania mechanizmu transferu wiedzy np. przez architekturę konstruowanych sieci neuronowych

Rozdział 4 – rozdział ten przedstawia syntetyczny opis wykorzystania metod uczenia maszynowego do predykcji identyfikacji i rozwoju uszkodzeń. W rozdziale szczegółowo przedstawiono problematykę powstania uszkodzenia i jego lokalizacji na podstawie dostępnych empirycznych danych z pomiarów i inspekcji na turbinach będących w zasobach korporacji. Rozdział szczegółowo przedstawia dostępne dane pomiarowe, jak również identyfikuje charakterystyki eksploatacyjne pozwalające na opracowanie modelu fizycznego. Ta część pracy przedstawia podejście do procesu uczenia i testowania modeli uczenia maszynowego na podstawie wybranych charakterystyk z danych operacyjnych zarejestrowanych dla dostępnych turbin. Na tej podstawie autor przedstawia wyniki klasyfikacji dla szeregu modeli regresyjnych wraz z miarami precyzji opartymi o normalizowany błąd średnio kwadratowy dla wybranego zestawu danych testowych. Wyniki testów w postaci stabelaryzowanej zostały porównane i przedstawione dla dobrze opisanego

zbioru metod uczenia maszynowego. Całość rozdziału zamyka podsumowanie uzyskanych wyników dla metod predykcji dla poszczególnych metod.

Rozdział 5 – przedstawia szczegółowe wprowadzenie i opis wykorzystania sztucznych sieci neuronowych opartych o prawa fizyki. Autor szczegółowo omawia architekturę zastosowanych rozwiązań sieci w oparciu o model fizyczny zmian parametrów termomechanicznych, wpływających na proces generowania i rozwoju pęknięć zmęczeniowych w łopatkach turbiny gazowej. Model zmian parametrów termicznych jest walidowany metodami symulacji numerycznych co pozwala na implementację modelu obliczeniowego do sieci PINN. Identyfikacja wpływu cykli obciążeń termicznych na proces rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego pozwala na przedstawienie równań propagacji pęknięć zmęczeniowych w rozważanych stopach kobaltu. Autor szczegółowo przedstawia proces szkolenia modelu wraz z identyfikacją parametrów wpływających na dokładność modelu – t.j. funkcji kosztu. Na podstawie uzyskanych wyników autor dokonuje szczegółowego omówienia uzyskanych wyników predykcji dla lokalizacji uszkodzeń ustalonych w rozdziale 4. Autor dokonuje porównania uzyskanych wyników predykcji z danymi uzyskanymi dla metod regresji. Co jest istotne, wartości błędów są zbliżone dla wartości zdecydowanie mniejszych zbiorów testowych i treningowych a w przypadku ich zwiększenia wartości błędów są zdecydowanie mniejsze. W dalszej części pracy autor przedstawia możliwość wykorzystania modelu źródłowego w innych modelach docelowych. Autor zwraca uwagę, na uwzględnienie różnic w warunkach fizycznych, dostosowania danych treningowych oraz adaptacji struktury sieci neuronowej. Stosowanie technik takich jak uczenie transferowe, rozszerzenie danych oraz regularyzacja może pomóc w skutecznym przeniesieniu i dostosowaniu modelu PINN do innych warunków obliczeniowych w szczególności w obszarze braku danych empirycznych w modelu docelowym. Istotnym elementem tego rozdziału było opracowanie procedury, która pozwala na przeniesienie modelu hybrydowego z domeny źródłowej, gdzie dostępne są dane o rozmiarach uszkodzeń, do domeny docelowej, gdzie takie dane są niedostępne. Kluczowym elementem tej procedury jest przesunięcie danych pomiarowych i zmiennych wejściowych PINN w domenę docelową, co pozwala na skuteczne zastosowanie niezmiennego modelu hybrydowego w nowej domenie. Jest to istotny uzyskany wynik badawczy w pracy pozwalający na podejście do tworzenia uogólnionego modelu hybrydowego do transferu modelu analitycznego do innej domeny docelowej.

Rozdział 6 – w rozdziale przedstawiono podejście do wykorzystania modelu do oceny problematyki zmian termicznych wpływających na proces utleniania i zmian grubości ścianek elementów turbiny. Rozdział przedstawia szczegółowy opis problemu, identyfikuje parametry operacyjne oraz użytkowe wpływające na ten proces. Na podstawie pozyskanych danych operacyjnych, autor przedstawia podział istotności zmian grubości ścianek w zależności od lokalizacji – związanej ze zmiennością parametrów termodynamicznych. Na tej podstawie

autor wybiera istotne analitycznie lokalizacje dla których jak w rozdziale poprzednim prowadzi proces analityczny (przedstawienia modelu) oraz proces trenowania i walidacji uzyskanych wyników dla modelu predykcyjnego. Autor przedstawia w rozdziale szereg wyników dla trenowania modeli z różną ilością dostępnych danych, w tym również dla jednej serii danych, które uzyskują zaskakująco dużą dokładność precyzji w stosunku do modeli regresyjnych.

Rozdział 7 – rozdział ten obejmuje podsumowanie wyników przeprowadzonych prac. Autor dokonuje szczegółowego podsumowania przeprowadzonych prac. Autor podkreśla użyteczność uzyskanych wyników w szczególności dla modeli opracowanych na podstawie sieci PINN w odniesieniu do modeli regresji przedstawionych w rozdziale 4. Autor wskazuje na znaczną użyteczność wykorzystania możliwości przeniesienia modelu do domeny w której nie będą dostępne dane pomiarowe, ale możliwe jest wykorzystanie modelu fizycznego implementowanego w sieciach rekurencyjnych z wykorzystaniem poprawek wynikających z modelu fizycznego. W dalszej części rozdziału autor identyfikuje nowatorskie wyniki uzyskane podczas realizacji pracy do których niewątpliwie należy zaliczyć:

- Skuteczność implementacji opracowanej metody dla dwóch różnych typów turbiny;
- Uzyskaną efektywność opracowanej metody dla różnych komponentów turbiny;
- Opracowanie odpowiednich funkcji regularyzacyjnych do identyfikacji uszkodzeń w oparciu o istniejące modele fizyczne.

Finalnie autor przedstawia dalszy cel i zamierzenia związane z prowadzeniem prac badawczych.

2. Ocena tematu, celu i zakresu pracy

Przedstawiona praca stanowi istotny wkład w rozwój dziedziny techniki diagnostyki technicznej związanej z oceną integralności konstrukcji maszyn wirujących. W pracy przedstawiono szereg zagadnień związanych z mechaniką konstrukcji, diagnostyką konstrukcji, modelowaniem parametrów użytkowych oraz eksploatacyjnych, szczegółową analizą danych wielowymiarowych oraz fuzją danych dla modeli fizycznych oraz danych empirycznych. Taka ilość przedstawionych obszarów i zagadnień dowodzi, że przedstawiona praca ma istotny walor interdyscyplinarny i zawiera istotny wkład w rozwój dziedziny pozwalający na powiązanie dziedzin naukowej eksploracji danych z inżynierią mechaniczną. Praca zawiera bardzo szczegółowy zapis szeregu procesów analitycznych oraz funkcjonalnych wynikających z przedstawionego modelu opisu rozwoju uszkodzeń, modelu procesów termomechanicznych pracy maszyny wirnikowej jak i mechanizmów związanych z procesem przygotowania, czyszczenia, analizy danych w tym przygotowania i trenowania modelu. Istotna jest również znaczna świadomość doktoranta w przygotowaniu modelu predykcyjnego poprzez modelowanie analityczne procesów pracy maszyny wirnikowej.

Doktorant określa cel główny i naukowy rozprawy, wskazuje szereg celów szczegółowych jak również zakres rozprawy w którym identyfikuje trzy główne kierunki użytkitarne. Przedstawiona praca zawiera dane rzeczywiste z zasobów firmy Baker Hughes dla produkowanych przez nią turbin gazowych, co powoduje, iż praca ma znaczący charakter użytkowy. Praca łączy w sobie prace koncepcyjne, analityczne i programistyczne w szczególności obejmujące wykorzystanie nowej dziedziny wiedzy jaką niewątpliwie jest wykorzystanie sieci neuronowych zasilanych modelem fizycznym do oceny intensywności pracy urządzeń wirnikowych. Biorąc powyższe pod uwagę **uważam, iż podjęcie zaproponowanej tematyki jest celowe i użyteczne** a praca z uwagi na jej zakres obejmujący badania analityczne, programistyczne, koncepcyjne i eksperymentalne ma walor użytkowy.

3. Ocena rozprawy

Przedstawiona do oceny rozprawa zawiera nowatorską tematyką bardzo aktualną i obejmującą wykorzystanie metod sztucznej inteligencji w dziedzinie diagnostyki urządzeń mechanicznych. Autor przedstawia użytkowy charakter rozprawy odnoszący się do wirtualizacji systemu eksploatacji maszyn i urządzeń wirnikowych w celu identyfikacji zagrożeń mogących wpłynąć na bezpieczeństwo i koszty dalszej eksploatacji takich urządzeń. Autor dogłębnie przedstawia podejście do analizy użytkowania takich urządzeń identyfikując parametry pracy wpływające na możliwość degradacji urządzenia w postaci powstawania uszkodzeń zmęczeniowych jak i uszkodzenia warstwy termicznej stanowiącej barierę antyerozyjną, co finalnie prowadzi do zmiany grubości ścianek urządzenia. Autor przedstawia bardzo szczegółowo procesy termomechaniczne pracy urządzenia, co pozwala na formułowanie i budowę modelu analitycznego który w dalszej części zasili utworzoną sieć neuronową do wnioskowania i korekcji uzyskiwanych wyników w oparciu o pozyskiwane dane pomiarowe. Na uwagę zasługuje również koncepcja transferu wiedzy do obszarów dla których użytkownik może nie dysponować danymi pomiarowymi lub danymi inspekcyjnymi w celu walidacji z utworzonym modelem. Kolejnym istotnym elementem na jaki należy zwrócić uwagę, jest możliwość poprawnego wnioskowania o możliwym uszkodzeniu na podstawie bardzo małej ilości danych (np. jedna obserwacja).

Praca zawiera odniesienie do aktualnego stanu wiedzy związanego z oceną i diagnozowaniem maszyn wirnikowych, jak również wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji do procesu wnioskowania o powstałych uszkodzeniach. Przedstawione opisy, podejście do analizy danych, jak również oceny możliwości wykorzystania tych danych do transferu oceny w innych obszarach badawczych świadczą o dobrze przygotowanym warsztacie badawczym kandydata. Przedstawiona praca spełnia w mojej ocenie wymagania związane z wniesieniem oryginalnego rozwiązania postawionego procesu badawczego a przeprowadzone badania i uzyskane wyniki

świadczą o bardzo dobrym przygotowaniu warsztatu naukowo – badawczego kandydata. Co więcej, należy podkreślić łączenie wiedzy z różnych dziedzin takich jak inżynieria mechaniczna i analityka danych.

Przedstawiona do oceny praca zawiera wszystkie niezbędne elementy samodzielnego procesu naukowego obejmującego sformułowanie problemu, ocenę stanu techniki, opracowanie modelu rozwiązania i walidacji a przedstawione wyniki stanowią, że ma charakter interdyscyplinarny i użyteczny.

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

- a) Bardzo poprawny język angielski i stosowane związki frazeologiczne;
- b) Bardzo ciekawą tematykę rozprawy związaną z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji w procesach diagnostycznych urządzeń wirnikowych;
- c) Identyfikację możliwych rozwiązań dla procesów diagnozowania i predykcji powstania uszkodzeń dla pęknięć zmęczeniowych i erozji. W szczególności na podkreślenie zasługuje możliwość wnioskowania o wielkości uszkodzenia na podstawie minimalnej ilości danych;
- d) Opracowanie metod analitycznych i ich implementację do sieci neuronowych w celu oceny wpływu tych parametrów na powstawanie uszkodzeń. Istotnym elementem tego rozwiązania jest opracowanie generalizowanego rozwiązania umożliwiającego transfer wiedzy do oceny innych obszarów badanych komponentów turbiny gazowej;
- e) Opracowanie architektury sieci dla rozwiązań postawionych problemów technicznych i jej testy;
- f) Przeprowadzenie szeregu badań w celu oceny możliwości wnioskowania i precyzji wnioskowania dla różnej liczności zbiorów pomiarowych – co stanowi istotny walor porównawczy (ang. benchmarking);
- g) Bardzo dobrze przeprowadzoną część badawczą obejmującą identyfikację stanu wiedzy i odniesienie do istniejących modeli;
- h) Bardzo dobrą znajomość narzędzi programistycznych stosowanych w warsztacie nowoczesnego badacza (Python z modułami Pandas, SciPy, Keras, PyTorch oraz bibliotekami wizualizacji);
- i) Możliwość wykorzystania wyników do implementacji w rzeczywistych rozwiązaniach.

Z uwagi na znaczny zakres przeprowadzonych badań i przedstawionych analiz praca nie jest wolna od wad do których zaliczam:

- a) Brak wizualizacji szeregu opisów uzyskanych wyników w postaci tabelarycznej lub graficznej (np. porównania modeli dla różnej ilości danych) zamiast prowadzonych opisów tekstowych, które często w natłoku znacznej ilości danych utrudniają analizę uzyskanych wyników;

- b) Brak oznaczeń wartości błędów i wartości rozrzutów uzyskanych danych na wykresach – co pozwoliłoby na łatwiejszą analizę zarejestrowanych danych;
- c) Brak odniesień z analizy literaturowej do przedstawionych wzorów i równań opisujących metody predykcji uszkodzeń (rozdział 2);
- d) Brak dyskusji o wyborze architektury sieci (np. str.67)
- e) Brak podanych np. procentowych wartości rozrzutu dla modeli przed procesem treningu i uzyskanych danych (np. rys. 21 str.87);
- f) Przytaczanie w tekście pełnych wartości obliczeń bez niezbędnych przybliżeń – co utrudnia analizę tekstu (np. str. 97).

Są to jednak nieścisłości i wątpliwości nie wpływające na merytoryczną ocenę pracy a wskazujące na możliwości wprowadzenia korekt przy dalszej pracy naukowej.

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

1. W jaki sposób wyznaczano parametry regularyzacji L1 i L2 przedstawione na str. 65?
2. W konkluzjach rozdziału 4 zawarto informację, że ograniczona liczba danych wpływa na arbitralność wyboru zbioru uczącego i testowego. Czy istnieje określony wymiar danych rejestrowanych dla których nie byłby to problem? Czy możliwe jest wykorzystanie technik augmentacji danych do wykorzystania w modelach regresji na dysponowanym zbiorze danych ?
3. W założeniach dot. problematyki rozwoju pęknięcia w oparciu o model równania Parisa zakłada się pewną wiedzę a priori dotyczącą wpływu temperatury i współczynników materiałowych. Jak na te warunki mogą wpływać ukryte wady materiałowe (np. wtrącenia). Na ile istotna jest ich identyfikacja w aspekcie predykcji ?
4. Proszę o wyjaśnienie przyjętych współczynników stałych podanych w równaniu (65) str.82 ?
5. Na rysunku 48, str. 124 przedstawiono wartości średnie z pomiarów grubości ścianek wraz z rozrzutami. Proszę o wyjaśnienie odrzucenia do dalszych analiz lokalizacji 2 (position 2), jeżeli z wykresu wynika, że wartość średnia grubości jest zbliżona do lokalizacji 1 (position 1) .

Uważam, iż pomimo przedstawionych uwag i wątpliwości, praca przedstawiona przez autora jest oryginalnym podejściem do wykorzystania w zastosowaniach przemysłowych i stanowi znaczący wkład w dalszy ich rozwój i wykorzystanie do utylitarnych zastosowań.

4. Wniosek końcowy

Praca doktorska przedstawiona przez mgr inż. Macieja Badory oraz zawartość i forma pomimo opisanych wad wskazuje na jego wiedzę i doświadczenie w zakresie wykorzystania metod

analizy danych oraz sztucznej inteligencji w diagnostyce przemysłowej. Na podstawie przedstawionej pracy uważam, iż doktorant umie formułować problemy badawcze, przygotować metodologię badań, wykorzystuje warsztat programistyczny w celu automatyzacji analiz i opracowania metod klasyfikacji.

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. Macieja Badory do publicznej obrony jego rozprawy.

