

**RECENZJA**  
**rozprawy doktorskiej**  
**mgr. inż. Jacka Michała Grochowalskiego**

pt.:” Detekcja nieciągłości w płytach wykonanych ze stopów  
niklowo-chromowych i aluminiowych z wykorzystaniem metody  
prądów wirowych oraz algorytmów sztucznej inteligencji”

Recenzja rozprawy mgr inż. Jacka Michała Grochowalskiego została opracowana na zlecenie  
Dziekana Wydziału Elektrycznego Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w  
Szczecinie (umowa o dzieło)

**1. Dane bibliograficzne rozprawy doktorskiej**

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska zawiera 77 stron w części w języku polskim, która składa się z 4 zasadniczych rozdziałów z podrozdziałami. Rozdziały 5-8 to odpowiednio wnioski podsumowujące prace, bibliografia (zawierająca 61 pozycji), oświadczenia o wkładzie procentowym autorów dołączonych artykułów w języku angielskim, które stanowią rozdział 8, w którym dodatkowo zawarto certyfikat i opis patentu przetwornika pomiarowego do badania materiałów przewodzących, którego współautorem wraz ze swoim promotorem był doktorant. W 4 artykułach przedstawionych jako cykl publikacji stanowiących rozprawę doktorską autor tejże rozprawy doktorskiej jest współautorem w jednej publikacji z 70% udziałem natomiast w pozostałych z udziałem 50%. Obszar bibliografii to głównie artykuły i monografie. Warto podkreślić że wiele z nich to materiały aktualne tj. opublikowane w ostatnich kilku latach.

**2. Ocena tematu rozprawy**

Recenzowana rozprawa dotyczy problemów badawczych związanych z wciąż aktualnymi badaniami nieniszczącymi, przy czym autor spośród grupy metod elektromagnetycznych zaprezentował metody defektoskopii wiroprądowej. W pracy doktorant przedstawił wyniki badań zarówno symulacyjne jak i

eksperymentalne związane z wykrywaniem uszkodzeń materiałów przewodzących przy zastosowaniu wzbudnika prądów wirowych opartego na obrotowej głowicy z magnesami trwałymi, a także przedstawił zmodyfikowaną metodę wykrywania defektów materiałowych, w których wzbudnikami są cewki zasilane prądem zmiennym. Na szczególne podkreślenie zasługuje możliwość zastosowania metody z magnesami trwałymi, które nie stanowią większego zagrożenia w obszarach zagrożonych wybuchem. W przypadku środowiska morskiego (jaki reprezentuje recenzent) ma to fundamentalne znaczenie. Ponieważ istotą badań nieniszczących jest identyfikacja defektów materiałowych autor wykorzystał w tym celu znaną metodę statystyczną zwaną kNN (k-nearest neighbours). Na tej podstawie uważam, że temat pracy sformułowany jest poprawnie, a tematyka jest ważna i aktualna.

### **3. Ogólna charakterystyka rozprawy**

Rozprawa doktorska nt.: Detekcja nieciągłości w płytach wykonanych ze stopów niklowo-chromowych i aluminiowych z wykorzystaniem metody prądów wirowych oraz algorytmów sztucznej inteligencji nie jest klasyczną monografią. Autor rozprawy w celu zaprezentowania swojej pracy wykorzystał przepis z ustawy (Art. 13 ust. 2) mówiący o spólnie tematycznym zbiorze opublikowanych artykułów w czasopiśmie naukowych określonych przez ministra właściwego ds. naukowych. Jak wspomniano w punkcie 1 recenzji autor zamieścił w pracy 5 oryginalnych artykułów w języku angielskim, które w rozdziałach 1-4 zostały szczegółowo omówione (w języku polskim). Podczas czytania rozprawy recenzent zaznaczył kilka miejsc, które jego zdaniem wzbudziły wątpliwości wymagające wyjaśnień (*a które zostały wyróżnione kursywą*). W dalszej części rozprawy skupiono się na zagadnieniach istotnych dla charakteru badawczego rozprawy.

#### **Rozdział 1 Wstęp**

We wstępie autor na podstawie studium literatury omówił znaczenie badań nieniszczących zwanych NDT (Non Destructiv Test). Wymienione są różne techniki wykorzystywane w badaniach nieniszczących, które zależą od rodzaju zachodzącego zjawiska fizycznego. Ponieważ autor pracy skupił się na badaniach wykrywających nieciągłość w płytach przewodzących w oparciu o metody prądów wirowych (ECT), nie przedstawił, żadnej analizy porównawczej istniejących metod w innych obszarach fizyki zjawisk aniżeli zjawiska elektromagnetyczne. Pod koniec wstępu autor zapowiada przedstawienie wyników badań pomiarowych dla płyt aluminiowych i niklowo-chromowych z wykorzystaniem dwóch typów przetworników. Na tym etapie (Wstęp) autor nie wspomina o prezentowanych w dalszej części pracy wynikach symulacyjnych z użyciem modeli realizowanych technikami MES.

## **Rozdział 2** Cel i Teza pracy

W rozdziale 2-gim (Cel i teza pracy) autor rozprawy uszczegóławia zadania jakie przed sobą postawił a mianowicie udoskonalenie defektoskopii prądów wirowych ECT w celu zwiększenia prawdopodobieństwa wykrycia wad materiałowych. *(nie podano na tym etapie jaką wcześniejszą metodę postanowiono udoskonalić – nie podano literatury)*. Następnie sformułowano dalsze cele podzielone na kilka etapów, czyli etap badań z wykorzystaniem ruchu magnesów trwałych, a następnie z użyciem cewek wzbudzających napięciem zawierającym składowe sinusoidalne (przy czym autor nie uszczegółowił czy te składowe są tylko harmonicznymi czy też interharmonicznymi lub subharmonicznymi). W tym punkcie autor wymienia jako następny etap pracy badania symulacyjne z zastosowaniem modeli 2D i 3D stworzonych w środowisku MES-owskim (później przyznano, że jest to środowisko COMSOL) *przy czym autor w tym punkcie nie stwierdza dobitnie czy jest twórcą czy współtwórcą tych modeli*. Następnym etapem było przetworzenie otrzymanych sygnałów i wreszcie identyfikacje wad wykorzystujących algorytm k-NN gdzie autor mówi o opracowanych algorytmach i systemach sztucznej inteligencji *(recenzent nie znalazł w pracy wspomnianego algorytmu wygenerowanego przez AI lub autor nie podkreślił, w którym miejscu jest on przedstawiony)*. Na koniec tego rozdziału autor pracy prezentuje Tezę, a pod nią wymienia cele szczegółowe, których zrealizowanie ma wykazać jej słuszność. Teza wydaje się poprawna chociaż równie dobrze frazę: „oraz algorytmu sztucznej inteligencji” można byłoby zastąpić „oraz metody najbliższych sąsiadów”

## **Rozdział 3:** Materiały i metody badawcze

W rozdziale 3-cim pracy autor omawia metody i obiekty poddane badaniom wiropiędowym. Na rys.3a,b przedstawiono badaną próbkę stopu aluminium, w której wykonano nacięcia o różnej głębokości widoczne na zdjęciu będące przykładem wad. Z kolei na rys.4 przedstawiono widok płytki wykonanej ze stopu INCONEL, na której nie widać żadnych wad materiałowych, (szkoda, że autor w tym miejscu nie wyjaśnił czy te wady detektor będzie wykrywał od strony powierzchni gdzie są one niewidoczne. *Zresztą podobnie należy zapytać jak wyglądałaby identyfikacja szczelin (wad) o różnych głębokościach w płycie gdyby je badać również od strony gdzie są widoczne (po odwróceniu szyny)*). W punkcie 3.3 autor przedstawia przetwornik wiropiędowy z głowicą obrotową, na której umieszczone są magnesy trwałe (w tym miejscu autor nie informuje jaki jest jego udział w konstrukcji takiego przetwornika). W punkcie tym jest także przedstawiony wynik symulacji z użyciem modelu przetwornika z magnesami trwałymi o ruchu-posuwisto-zwrotnym, którego szerszy opis przedstawiono w patencie na końcu pracy, a autor rozprawy jest współtwórcą w 45%. Na rys.5. i 6 przedstawiono wyniki symulacji gęstości prądów wirowych, ale nie podano skali wartości na osi rzędnych. Nie podano również (w tym punkcie) prędkości obrotowej dla obrotowego przetwornika

(rys.5) ani prędkości liniowej dla przetwornika z ruchem posuwisto-zwrotnym. W punkcie 3.4 omówiono wiroprowodowy przetwornik z cewkami wzbudzającymi, gdzie zastosowano wzbudzenie nazwane wieloczęstotliwościowym (czyli składającym się z sinusoid o różnych częstotliwościach), przy czym autor opisuje wprowadzony we współautorskim artykule sposób modyfikacji metody wieloczęstotliwościowej polegający na zamianie sygnału ciągłego wzbudzenia wycinkiem czasowym z tego sygnału określonym jako impuls. Wzór (2) określający sygnał wzbudzający w punkcie 3.5 nie jest szczegółowo wyjaśniony w tym miejscu w pracy, mianowicie nie podano zastosowanych częstotliwości. Można je odnaleźć dopiero w załączniku (artykule [III]), gdzie przyjęto pierwszą częstotliwość równą 36Hz a pozostałe to głównie interharmoniczne. Ostatnia częstotliwość wynosi  $f=204\text{Hz}$ . Recenzent *nie znalazł żadnego wyjaśnienia ani w części polskiej ani angielskiej czym kierował się autor wybierając taki zakres częstotliwości*. W tabeli 3 autor podał parametry cewek wzbudzających i pomiarowych oraz rdzenia czujnika. *Wyjaśnienia wymaga podanie stałej wartości względnej przenikalności magnetycznej rdzenia ferrytowego będącego elementem nieliniowym*. W punkcie 3.6 autor przedstawia wybrane ekrany modelu przetwornika różnicowego zrealizowanego w środowisku Comsol-Multiphysics, (przy czym autor na tym etapie nie podaje informacji czy jest współautorem tego modelu). W tym punkcie również przedstawiono siatkę elementów dla przetwornika posuwisto-zwrotnego. *Wyjaśnienia wymaga wygląd siatki dla pozycji magnesu w trakcie ruchu z rys.13 gdzie występują wydłużone elementy prostokątne co zgodnie z praktyką symulacyjną w środowisku MES może prowadzić do dużych błędów numerycznych*. Rozdział 3 zamyka punkt 3.7, w którym autor zapowiada wykorzystanie algorytmu najbliższych sąsiadów do identyfikacji głębokości i długości wykrytych wad. *Przy czym na tym etapie nie jest wyjaśnione w jaki sposób oblicza się odległość między nowym klasyfikowanym obiektem a wszystkimi obiektami w zbiorze uczącym się jak również jakie kryteria przyjęto do określenia parametru  $k$  (czyli liczby najbliższych sąsiadów)*.

#### **Rozdział 4: Omówienie wyników badań**

W rozdziale 4-tym zawarto opis w języku polskim dołączonych artykułów ponumerowanych od [I] do [IV] i tak w punkcie 4.1 omówiono i przedstawiono wyniki związane z badaniami z użyciem obrotowej głowicy z magnesami trwałymi. Na rys.17 (str. 37) przedstawiono rozkład gęstości prądów wirowych niestety bez skali (owszem skala jest pokazana w anglojęzycznym artykule). Podobnie na wykresie indukcji magnetycznej (rys.17c) nie jest opisana oś rzędnych. Ponadto siatka obiektu z rys. 17b nie odpowiada obiektowi z rys.17a. W tabeli 4 podane są parametry modelu użyte w przeprowadzonych symulacjach. *Wyjaśnienia wymaga pojęcie „jednego punktu pomiarowego” w aspekcie ruchu obrotowego głowicy z podaną prędkością 2400 obr./min. Z drugiej strony w następnym punkcie autor zwraca uwagę na zmieniającą się (nie stabilizowaną) prędkość głowicy w zależności od odległości*

przetwornika od wady. W punkcie 4.2 przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych z użyciem przetwornika obrotowego. Szkoda, że w polsko-języcznym opisie nie ma jednoznacznej deklaracji procentowego udziału doktoranta w konstrukcji takiego przetwornika (z opisu udziałów przedstawionych pod koniec artykułu [II] wynika, że autor rozprawy brał udział w zaprojektowaniu i przeprowadzeniu badań eksperymentalnych oraz analizie wyników pomiarowych). Autor w tym punkcie wyznaczał odchylenie napięciowego sygnału pomiarowego w oparciu o wartości skuteczne sygnałów uzyskanych dla materiałów bez wady i z wadą. Szkoda, że nie przedstawiono w tym miejscu chwilowych przebiegów tych sygnałów napięciowych. Na rys.21 przedstawiono charakterystyki odchyżeń napięciowych w funkcji położenia wady względem czujnika dla prędkości obrotowej 3700obr./min. a na podstawie tych przebiegów wyznaczono charakterystykę maksymalnej wartości w funkcji głębokości wad. Wydaje się, że niektóre punkty z rys.23 nie odpowiadają maksymalnym wartościom wykresów z rys.21 podobnie jak w przypadku rys.25 i rys.24 co wymaga wyjaśnienia. W opisie powyższych rysunków autor wyznaczone krzywe aproksymacyjne nazywa interpolacyjnymi (w opisie angielskim jest poprawnie - approximation).

W punkcie 4.3 autor powtórnie opisuje przetwornik, w którym wzbudzenie prądów wirowych stanowi układ magnesów trwałych o posuwisto-zwrotnym ruchu. Szerzej powyższy przetwornik jest opisany w zgłoszeniu patentowym dołączonym jako załącznik [P1] na końcu pracy. W opisie tym przedstawiono dotychczasowe istniejące patenty tego typu przetworników wykazując, że rozwiązanie autorów, w którym doktorant ma 45%, udział stanowi oryginalne osiągnięcie nie tylko na tle krajowym, ale również zagranicznym. W dysertacji recenzent nie znalazł, żadnych wyników badań z użyciem powyższego przetwornika, chociaż patent udzielono w październiku 2022 roku. Należy w tym miejscu podkreślić, że doktorant jest współtwórcą 4 innych zgłoszeń patentowych, gdzie jego udział wynosi 40%.

W punkcie 4.4 przedstawiono wyniki badań zawarte w anglojęzycznym artykule [III] dotyczące wspomnianej już wcześniej nowej metody wiroprowadowej zwanej (PMFES-ECT) charakteryzującej się w stosunku do poprzedniej tym, że wzbudzenie składające się z sumy sinusoid o różnej częstotliwości stanowi impuls. Autor wspomina, że w artykule [IV] porównano dwie metody MFES-ECT oraz PMFES-ECT (z wykorzystaniem modelu 3D w programie COMSOL), ale recenzent w tym artykule ([IV]) nie znalazł takiego porównania, natomiast autor w punkcie 4.4 porównał obie te metody poprzez zestawienie zlogarytmowanego stosunku sygnału do szumu SNR, gdzie rzeczywiście dla metody PMFES-ECT dla głębokości wady 10% stosunek ten jest korzystniejszy. Autor jednak wnioskuje, że już od głębokości wady 20% wyniki z obu metod są podobne (szkoda, że tabelka nie zawiera wyników dla pozostałych głębokości). Doktorant w tym punkcie na przemian powoływał się na wyniki symulacyjne i eksperymentalne i na obie metody (MFES-ECT oraz PMFES-ECT). Niestety zabrakło takiej informacji w podpisach rysunków.

Punkt 4.5 opisuje tę część artykułu [IV], w której przedstawiono zastosowanie algorytmu k-najbliższych sąsiadów do estymacji parametrów defektów wykrywanych w przewodzących płytach metodą prądów wirowych (PMFES-ECT). W tym celu określono grupy predyktorów osobno do estymacji głębokości i osobno do estymacji długości. Grupa D3 wykorzystywała parametry  $\alpha, \gamma$  występujące w exponencjalnej funkcji interpolującej charakterystykę częstotliwościową  $S(f)_{x=x_{\max}}$ . W angielsko języcznym artykule [IV] powołano się w tym miejscu na artykuł [29] Barrata i innych. Jednak należałoby uzasadnić wybór takiego nieliniowego wzoru użytego do interpolacji. Na stronie 64 dysertacji autor napisał: „W przypadku oceny głębokości, grupy predyktorów D-1a oraz D-1b, otrzymały podobny wyniki dokładności estymacji (wartości funkcji strat). Natomiast dla grupy D-2, wartość tego współczynnika okazała się być najmniejsza” *Wydaje się, że nie odpowiada to wartościom zawartym w tabeli 9.* W omawianym punkcie 4.5 nie przedstawiono tej części artykułu [IV] opisującej model przetwornika z cewkami wzbudzającymi oraz wyników porównujących przebiegi różnicowych napięć  $\Delta U$  uzyskanych z symulacji modelu i z pomiarów. Z rys.9 (art. [IV]) widać, że najlepszą zbieżność uzyskano dla głębokości wad 60% i 20%, a zdecydowanie najgorszą dla wady o głębokości 100%. Ta duża niezgodność nie została uzasadniona w pracy.

#### **4. Uwagi szczegółowe i ogólne (wymagające ustosunkowania się )**

Najważniejsze uwagi szczegółowe zostały wskazane w powyższych punktach recenzji i wyróżnione kursywą. Uwaga natury ogólnej to:

Brak punktu, w którym doktorant wymienia najważniejsze swoje osiągnięcia w ramach prezentowanej rozprawy.

Brak odniesienia do problemu (zagrożenia) odkształceń mechanicznych badanych próbek zwłaszcza przy impulsowym charakterze wzbudzenia i indukowania się prądów wirowych, co może spowodować jeżeli nie uszkodzenie próbki to odkształcenie sprężyste mające wpływ na wynik pomiaru.

#### **5. Ocena poziomu wydawniczego i redakcyjnego**

Stronę edycyjną pracy oceniam wysoko, rysunki w większości starannie dopracowane i szczegółowo opisane. Praca jest napisana językiem poprawnym i zwięzłym. Jedynym mankamentem jest brak wykazu oznaczeń i symboli stosowanych wielkości powszechnie umieszczanych na początku prac.

## 6. Ocena rozprawy doktorskiej

Wybór tematyki rozprawy w świetle przeprowadzonych studiów literaturowych określający obecny stan wiedzy uważam za właściwy. Zakres rozprawy, jaką zrealizował doktorant dla osiągnięcia założonych celów również uznaję za wystarczający. Stwierdzam, na podstawie zaprezentowanych badań zarówno symulacyjnych jak i eksperymentalnych przy zastosowaniu własnych autorskich modeli i stanowiska pomiarowego, że autor wykazał się wiedzą teoretyczną i praktyczną w zakresie dyscypliny naukowej, której dotyczy dysertacja. Na podkreślenie zasługuje jego współautorstwo w pracach, w wyniku których uzyskano patent krajowy, jak i oczekiwane jest przyjęcie jeszcze 4-ch zgłoszonych.

## 7. Wniosek końcowy

**Biorąc pod uwagę pozytywną ocenę rozprawy doktorskiej mgr. inż. Jacka Michała Grochowalskiego** nt.: „Detekcja nieciągłości w płytach wykonanych ze stopów niklowo-chromowych i aluminiowych z wykorzystaniem metody prądów wirowych oraz algorytmów sztucznej inteligencji” stwierdzam, że recenzowana dysertacja spełnia wymogi Ustawy z 14 marca 2003 roku „*O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki*”, [tj. Dz. U. z 2017r. , poz. 1789, ze zm.].

**W związku z powyższym stawiam wniosek o dopuszczeniu rozprawy doktorskiej mgr. inż. Jacka Michała Grochowalskiego do publicznej obrony.**

Gdynia 16.09.2024



