

Łódź, 06-07-2026 r.

prof. dr hab. inż. Sławomir Wiak, *mutli dr h.c.*
Instytut Mechatroniki i Systemów Informatycznych
Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki
Politechnika Łódzka

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr inż. Michała ŻUŻAŁKA

**p.t."GRZANIE INDUKCYJNE MATERIAŁÓW WARSTWOWYCH
ŁĄCZONYCH WYBUCHOWO"**

wykonanej pod opieką:

dr hab. inż. Andrzej WAINDOK, *prof. Uczelni, jako promotor*
oraz **dr inż. Paweł PIEKIELNY**, *jako promotor pomocniczy*

Podstawa i cel opinii

Opinię niniejszą opracowałem na podstawie pisma W imieniu Przewodniczącego komisji awansu prof. dr. hab. inż. Sebastiana Boruckiego Politechniki Krakowskiej z dnia 27.03.2026 r.

Podstawą opinii jest ocena osiągnięć naukowych Kandydata zawartych w przygotowanej Pracy Doktorskiej. Niniejsza opinia dotyczy wniosku o nadanie stopnia naukowego dr inż. Panu mgr inż. Michałowi Żużalkowi w dziedzinie nauk inżynijne - technicznych, dyscyplina: **Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.**

1. Ocena wyboru tematu rozprawy

Praca doktorska zatytułowana „**Grzanie Indukcyjne Materiałów Warstwowych Łączonych Wybuchowo**” dotyczy aktualnej i rozwijanej w ostatnich latach dziedziny projektowania przetworników elektromechanicznych wspomaganych komputerowo.

Wniknięcie we współczesne tendencje badawcze, w tym technologie komputerowe w dziedzinie zastosowań elektromagnetyzmu oraz tzw. „elektromagnetyzmu obliczeniowego”, wspartego nowoczesnymi systemami informatycznymi prowadzi do następujących wniosków:

- w większości struktur elektrotechnicznych podstawową rolę odgrywa pole elektromagnetyczne;
- rozbudowane systemy komputerowe potrafią już dać odpowiedź na pytanie, jaki jest rezultat działania systemu, w tym przypadku rozkład pola elektromagnetycznego, dla różnych struktur geometrycznych analizowanych obiektów, przy różnych warunkach granicznych;

- posiadane narzędzia numeryczne pozwalają na prowadzenie obliczeń elektromagnetycznych dla złożonych systemów i urządzeń.

Autor rozprawy stwierdza; cytuję (str. 10): „Współczesne urządzenia do nagrzewania indukcyjnego, w wyniku rozwoju technologii – zwłaszcza w zakresie elementów półprzewodnikowych – uległy istotnym zmianom. Przede wszystkim zmniejszeniu uległy gabaryty, co wynikało z podniesienia częstotliwości pracy. Dodatkowo zakres uzyskiwanych częstotliwości znacząco rozszerzył obszar zastosowań”.

Powyższą opinię w zakresie rozwoju współczesnych technologii nagrzewania indukcyjnego elektromagnetycznego tej klasy należy uznać poprawną.

Tematykę rozprawy uważam za w pełni aktualną i nowoczesną.

2. Cel i tezy pracy (str. 37)

W wyniku przeprowadzonych analiz w oparciu o dostępne publikacje Doktorant słusznie stwierdza, iż (cytuję):

„Brakuje opracowań i badań obejmujących grzanie indukcyjne materiałów warstwowych łączonych wybuchowo. Dlatego też głównym celem niniejszej rozprawy doktorskiej były badania tego typu materiałów pod kątem zjawisk występujących w trakcie nagrzewania indukcyjnego”.

Realizacja wymienionego celu wymagała przeprowadzenia zarówno złożonych symulacji numerycznych, jak i badań eksperymentalnych z zakresu szeroko pojętej elektrotechniki i termiki”.

Doktorant definiuje poprawnie cel pracy oraz cele dodatkowe (uzupełniające): (rozdz. 3 – str. 37). Doktorant zdefiniował również cele pośrednie pracy (podpunkty a-h).

Należy zwrócić uwagę, iż zdefiniowane przez Doktoranta cele pośrednie, nie są celami pośrednimi (w mojej opinii).

Niniejsze cele są celami strategicznymi w dziedzinie Nauk Technicznych: przeglądu literatury w zakresie nagrzewania indukcyjnego, modelowania (modele numeryczne), projektowania i budowy dwóch stanowisk pomiarowych, weryfikację modeli numerycznych poprzez wykonanie pomiarów, projektowania układów wzбудnika do nagrzewania materiałów wielowarstwowych oraz wytwarzania testowych wzбудników.

Cele pracy zdefiniowano poprawnie.

Doktorant przeprowadził badania dla dwóch, różnych zestawów materiałów:

- **bez warstw ferromagnetycznych** – prostsze w symulacji (jak słusznie stwierdza Doktorant)
- **z warstwami ferromagnetycznymi** – bardziej złożone.

Pozyskana przez Doktoranta wiedza była podstawą do projektowania nowoczesnych i wysokoefektywnych urządzeń do podgrzewania różnych typów materiałów z wykorzystaniem nagrzewania indukcyjnego.

W oparciu o pozyskaną wiedzę **Doktorant definiuje poprawnie tezy pracy**, cytując:

- Analiza polowa umożliwia na etapie projektowania, wyznaczenie poprawnego rozpyłu prądów wirowych, strat mocy oraz temperatury w materiale warstwowym wytworzonym metodą platerowania wybuchowego.
- Możliwe jest zaprojektowanie i wykonanie układu wzбудników dedykowanych dla grzania materiałów wielowarstwowych łączonych wybuchowo, w tym, w technologicznych procesach ich przetwarzania.

3. Przegląd literatury (str. 39-40)

Jak słusznie stwierdza Doktorant, cytując: „Obliczenia grzania indukcyjnego materiałów w szerokim zakresie wymagają uwzględnienia zmienności parametrów materiałowych w funkcji temperatury oraz indukcji magnetycznej”.

W wyniku dokonanego przez Doktoranta przeglądu literatury, zawierającego 88 pozycji, zdefiniowano listę parametrów dla materiałów, których zmienność w funkcji temperatury należy uwzględnić:

- ciepło właściwe,
- przewodność cieplna,
- przewodność elektryczna,
- krzywa magnesowania. przedstawione przez Doktorant wraz z weryfikacją na podstawie przeprowadzonych pomiarów.

Należy podkreślić, iż wyżej wymienione parametry są rzadko definiowanymi z wykorzystaniem dedykowanych funkcji, ewentualnie określone współczynniki dla których określone są zbiory danych na podstawie badań empirycznych dla wybranych modeli.

Jak słusznie stwierdza Doktorant (cytuje): „Rzadko zdarza się, że parametry te podaje się w funkcji temperatury. Pomocne są tutaj biblioteki wybranych grup materiałów, które są zintegrowane z systemami symulacyjnymi (obliczeniowymi). Dla przykładu oprogramowanie ANSYS wykorzystuje dodatek *Granta Materials Data*, który gromadzi modele materiałowe dla kilkuset różnych materiałów. Takie połączenie znacząco ułatwia i przyspiesza poszukiwanie wymaganych parametrów.”

W związku z powyższym Doktorant podjął się w niniejszej pracy z sukcesem zadania uzupełniona tej wiedzy wraz z jej weryfikacją poprzez przeprowadzone pomiary dla przedstawionego podejścia.

W niektórych przypadkach [pozycja nr.60 w wykazie literatury], jak słusznie stwierdza Doktorant, uwzględnia się również zmianę gęstości nagrzewanego wsadu. Należy zauważyć, iż wymienione parametry rzadko są zdefiniowanymi jako funkcje, czy też mają określone współczynniki, które określone są dla nich jako zbiory danych na podstawie badań empirycznych (wnioski zdefiniowane poprawnie przez Doktoranta).

W ramach przeprowadzonej przez Doktoranta analizy i przeglądu systemów obliczeniowych, pod kątem ich potencjału obliczeniowego oraz możliwości ich implementacji dla zagadnień związanych z modelowaniem złożonych struktur dwu i trójwymiarowych - zwrócono szczególną uwagę na możliwości tworzenia modeli dla pola EM oraz modeli termicznych pod kątem symulacji grzania indukcyjnego.

4. Oprogramowanie i weryfikacja „pomiarowa” modeli numerycznych **(str. 40-46)**

W ramach dokonanego przez Doktoranta przeglądu literatury w zakresie dostępnych systemów obliczeniowych (oprogramowania) zwrócono szczególną uwagę na możliwości budowy modeli, zarówno modeli 2D oraz 3D, dla pola EM, jak również modeli termicznych pod kątem symulacji grzania indukcyjnego, systemów obliczeniowych oprogramowania tej klasy, jak Altair Flux, ANSYS, COMSOL, JMAG, OPERA, ELTA.

Uwagi dotycząca poprawności sformułowań (przykłady - str .41):

1. *„Poruszono” tutaj problem modelowania i prawidłowej definicji*
2. Wyniki symulacji zostały potwierdzone pomiarami fizycznej cewki (wynikami pomiarów)
3. Weryfikacja pomiarowa modelu numerycznego

Na szczególną zasługuje komentarz Doktoranta dotyczący sztucznej inteligencji, cytując (str. 42):

„W dobie bardzo silnego rozwoju sztucznej inteligencji (SI) trenowane są dedykowane modele do przewidywania rozkładów pola [67,68]. Modele takie operują na rozbudowanych bazach danych, na podstawie których modele SI zaczynają rozpoznawać różne zależności. Dokładność modeli niejednokrotnie zależy od wielkości bazy danych na podstawie, której model został wytrenowany. W typowych aplikacjach zgodność wyników z symulacją MES może być bliska 100%.”

W wyniku przeprowadzonej analizy porównawczej modeli numerycznych (str.42-43) Doktorant stwierdza, cytując: *„Weryfikacja modelu numerycznego decyduje o przydatności i jakości wybranych publikacji) zbiór przygotowanej symulacji. Bez tego etapu prac uzyskane wyniki mogą okazać się niewiarygodne lub zostać podważone.”* W pełni zgadam się z wnioskiem Doktoranta – jest to oczywisty wniosek.

Doktorant przeprowadził weryfikację modeli numerycznych na podstawie bezpośredniego porównania wyników uzyskanych w drodze symulacji z wynikami przeprowadzonych pomiarów dla różnych geometrii, lub w różnych punktach pomiarowych - w oparciu o dostępne publikacje.

Doktorant stwierdza, cytując:

„W związku z powyższym w przedstawianej pracy podjęto próby uzupełnienia tej wiedzy poprzez:

- *Przeprowadzenie weryfikacji pomiarowej modelu w szerokim zakresie temperatur.*
- *Uwzględnienie etapu swobodnego chłodzenia wsadu.*
- *Weryfikację modelu dla temperatur powyżej temperatury Curie (w przypadku wsadów z materiałem ferromagnetycznym).*

Należy podkreślić, iż jest to kluczowy wniosek dotyczący strategii w obszarze badań i wdrożeń.

W rozdziale 4.4. przedstawiono budowę nagrzewnic indukcyjnych w formie schematu blokowego budowy podstawowej nagrzewnicy indukcyjnej wraz z opisem poszczególnych członów schematu. Opis jest w pełni wystarczający.

5. Opis środowiska obliczeniowego i modeli numerycznych **(str. 47-66)**

W celu budowy modeli numerycznych **Doktorant słusznie zdecydował się wykorzystać** pakiet oprogramowania symulacyjnego ANSYS.

Natomiast do budowy modeli numerycznych wykorzystano dwa główne programy:

- Maxwell – modelowanie pola EM (obecnie Electronics Desktop),
- Fluent – symulacja przepływów oraz pola temperatury.

Oceniam tą strategię za w pełni poprawną i efektywną w kontekście prowadzonych badań.

Przygotowanie w pełni funkcjonalnej symulacji składa się z ośmiu etapów, opisanych przez Doktoranta precyzyjnie w pracy.

Jak słusznie stwierdza Doktorant, cytując: „Symulacja ta działa na zasadzie połączenia symulacji termodynamicznej z symulacją pola EM, gdzie w jednym module są obliczane straty wiroprowodowe, a na ich podstawie jest obliczany rozkład temperatury”.

Należy stwierdzić, iż kluczowym wyzwaniem jest budowa modelu numerycznego danego obiektu z precyzyjnym odtworzeniem geometrii obiektu rzeczywistego.

Ten aspekt strategii komputerowego modelowania struktur trójwymiarowych, precyzyjnego odtworzenia geometrii obiektu rzeczywistego, jest obszernie omówiony w podrozdziale 5.1. (str. 48-62) i zawiera następujące kluczowe dla pracy opisy i analizy w kontekście wykonania modelu trójwymiarowego:

- geometria symulowanego modelu wraz z zastosowanymi uproszczeniami (Autodesk Inventor Professional), rys.5.3 (str.49)
- Proces przypisywania materiału do wybranej bryły, rys.5.4 (str.50)
- Definicja wymuszeń. realizowana poprzez definicję źródła zmiennego pola EM, dla danego modelu numerycznego. Użytkownik ma dostępne dwie podstawowe opcje: gęstość prądu i wartość prądu, rys.5.5 (str.51)
- Przypisanie warunków brzegowych. Doktorant w procesie modelowania zastosował następujące opcje: Odd Symmetry (Flux Tangential), Even Symmetry (Flux Normal), Radiation, Default Boundary Condition. Jako przykład Doktorant przedstawia obiekt 3D (bryła) z przypisanymi warunkami brzegowymi (rys. 5.6). Należy stwierdzić, iż poprawna definicja (określenie) warunków brzegowych stanowi klucz do dalszych poprawnych procedur (symulacji).
- Określenie warunków środowiska – na przykładzie Pakietu Maxwell
- Dyskretyzacja modelu (jeden z kluczowych aspektów i wyzwań w kontekście odwzorowania poprzez model dyskretny zjawisk zachodzących w danej trójwymiarowej strukturze). Jak słusznie stwierdza Doktorant, cytując: *„Od poziomu dokładności przygotowania tego etapu zależy jakość i przydatność wyników oraz czas wykonywania symulacji.”* Należy w pełni zgodzić się ze opinią Doktoranta, cytując: „Problem pojawiał się głównie podczas generowania siatki elementów, gdzie występuje silne zjawisko naskórkowości, czyli przede wszystkim w materiałach ferromagnetycznych”.

Istotne jest stwierdzenie i wiedza Doktoranta dotycząca poprawnego generowania siatki dla struktur 3D. W oprogramowaniu Maxwell 3D występuje dedykowana opcja, jak stwierdza Doktorant, „która na podstawie zadanej głębokości wnikania pola EM oraz preferowanej wielkości elementu pozwala zagęścić siatkę na danej powierzchni.”

Efekt zastosowania opcji zagęszczania siatki dyskretyzacyjnej na podstawie wnikania pola EM przedstawiono na rys. 5.9 (str.54). Istotna jest przeprowadzona przez Doktoranta analiza z wnioskiem, iż: *„Niestety narzędzie to nie zawsze generuje w pełni poprawną siatkę. Zdarzają się miejsca, gdzie w jednym węźle zbiega się wiele wierzchołków sąsiadujących elementów i budowany jest jeden duży węzeł przy powierzchni jak to zobrazowano na rys. 5.10.”*

Rozwiązaniem tego problemu jest dodatkowe „wymuszenie na algorytmie stworzenia kolejnych warstw elementów dyskretnych. Doktorant rozwiązał ten problem „poprzez ręczne wprowadzenie dodatkowych płaszczyzn dzielących model na mniejsze obszary.” Przeprowadzone analizy metodą doświadczalną umożliwiły zdefiniowanie następujących głębokości płaszczyzn wspomagających, wyrażonych, jako procent głębokości wnikania pola EM: 10%, 15%, 30%, 50%, 80%, 110%, 140% oraz 180%.

Efekt zastosowania opcji zagęszczenia siatki dyskretyzacyjnej przy pomocy opcji „Skin Depth Based...”, nakierowanej na uzyskanie wysokiej dokładności odwzorowania obiektu fizycznego przedstawiono na Rys. 5.9 (str.54). *Z kolei działania algorytmu generującego siatkę z lokalnymi błędami przedstawiono Rys.5.10a. Efekt naprawy lokalnego błędu dodatkowymi mechanizmami nie istnieje Rys.5.10b.*

Oprogramowanie Maxwell 3D posiada mechanizmy automatycznej adaptacji siatki mechanizm *Adaptive Meshing*, oparty na wykonaniu odpowiedniej liczby iteracji, jako kryterium zbieżności. Wyniki tej analizy przedstawiono na rys. 5.11.

Jak słusznie stwierdza Doktorant, Proces ten można znacząco przyspieszyć z „góry” wskazując oprogramowaniu, gdzie ma zastosować siatkę o większej gęstości. Jest to wniosek słuszny i oczywisty.

Strategicznym celem jest osiągnięcie zadanej dokładności błędu pola elektromagnetycznego w całej domenie obliczeniowej przy minimalnej liczbie elementów (*nie istnieje pojęcie zadana dokładność błędu*). Mechanizm ten nazywany jest *Adaptive Meshing*.

Niestety jest to metoda iteracyjna, która z zasady do osiągnięcia zakładanego błędu energii oraz kryterium zbieżności wymaga odpowiedniej liczby iteracji, co znacząco wydłuża czas obliczeń. Proces ten można znacząco przyspieszyć wskazując apriori obszary (2D/3D) z siatką o większej gęstości. Działanie tej opcji Doktorant przedstawił na rys. 5.11. Przeprowadzoną przez Doktoranta analizę oceniam bardzo pozytywnie.

Kolejnym etapem badań jest przeprowadzenie symulacji pola EM. Do symulacji zjawisk związanych z prądami wirowymi oprogramowanie Maxwell zaimplementowano metodę $\mathbf{T} - \mathbf{\Omega}$, wykorzystującą wektorowy potencjał elektryczny $\mathbf{T}$ oraz zredukowany skalarny potencjał magnetyczny $\mathbf{\Omega}$ (str. 55-62). Ideowy schemat działania algorytmu obliczeniowego w Maxwell 3D przedstawiono na rys. 5.14.

Po wykonaniu wszystkich niezbędnych obliczeń, jak stwierdza Doktorant, można przejść do obróbki otrzymanych wyników. Najistotniejszymi elementami, które poddawane były analizie (jak słusznie stwierdza Doktorant) i można je jednoznacznie określić: rozkład strat wirowych, rozkład indukcji magnetycznej, rozkład prądów wirowych oraz całkowite straty wirowe.

Przykładowy rozkład strat wirowych przedstawiono na Rys. 5.15:- po lewej stronie rozkład strat wirowych oraz prądów wirowych na powierzchni próbki.

Następnym krokiem w procesie (procedurze) modelowania jest budowa modelu z wykorzystaniem pakietu Fluent. Jako wynik niniejszej analizy Doktorant przedstawia „fragment wygenerowanej siatki na potrzeby symulacji termodynamicznej”, (str. 66).

Kolejnym krokiem, jak słusznie stwierdza Doktorant, procesu symulacji termodynamicznej, poprawnie określonym jest zdefiniowanie (określenie) warunków brzegowych (str. 61), zamieszczonych na rys. 5.19 (str.62). Straty wyznaczono z wykorzystaniem oprogramowania Maxwell 3D.

Kolejnym krokiem, w kontekście procedur jest import rozkładu i wielkości strat wirowych w obszarach, które są nagrzewane, jako etap przygotowania symulacji termodynamicznej z wykorzystaniem pakietu Maxwell 3D. Schemat ideowy działania algorytmu rozwiązywania symulacji w programie Fluent przedstawiono na rys. 5.20. Doktorant przedstawia wygenerowane przykładowe rozkłady temperatury w domenie symulacyjnej oraz rozkład temperatury na powierzchni i przekroju badanej próbki (na rys. 5.21. i 5.22).

W mojej opinii chcę wyraźnie podkreślić wysoki poziom wiedzy Doktoranta w obszarze metod numerycznych, oprogramowania oraz implementacji tej wiedzy do „wysokiej klasy inżynierskich zastosowań”.

Kolejnym etapem prowadzonych badań i analiz jest „Badanie materiałów wielowarstwowych bez warstw ferrytycznych” (rozdział 6).

6. Badania materiałów wielowarstwowych bez warstw ferrytycznych (str. 67-90)

Koncepcję prostszego modelu numerycznego przygotowano, zaproponowany przez Doktoranta, dla obiektu jakim jest „materiał wielowarstwowy nie zawierający warstw ferrytycznych”.

Przeprowadzenie badań dla prostszego materiału pozwoliło na wstępne sprawdzenie poprawności wykonanych modeli numerycznych. Jest to w mojej opinii słuszne i efektywne podejście nakierowane na skuteczne, (cytuję, str.67) „wstępne sprawdzenie poprawności wykonanych modeli numerycznych”. Zestawienie wymiarów próbek oraz grubość ich warstw przedstawiono w Tabeli 6.1. Materiały zostały precyzyjnie dobrane przez Doktoranta pod kątem zróżnicowania ich parametrów oraz geometrii.

Doktorant wybrane próbki przygotowane do badań zaprezentował na rys. 6.1. (str. 68). Zaprojektowany przez Doktoranta i zbudowany wzбудnik do badań zamontowano na generatorze, rys. 6.2. (str. 68).

Doktorant dla prowadzonych badań zastosował przemysłową nagrzewnicę indukcyjną firmy DACPOL o mocy znamionowej 20 kW, zakresie częstotliwości generatora częstotliwości 20÷60 kHz. Efektem wyboru tego zakresu częstotliwości jest możliwość zastosowania wzbudników o indukcyjności od 0,5 μH do 3,5 μH .

Doktorant zaimplementował dwie metody pomiaru (stykową oraz bezstykową), w celu zweryfikowania poprawności działania metod bezstykowych w szerokim zakresie temperatur. Należy podkreślić, iż są one wrażliwe na zmianę współczynnika emisyjności, który nie jest stały w funkcji temperatury (w szczególności w przypadku metali - jak słusznie stwierdza Doktorant). Rozmieszczenie punktów pomiarowych na wytypowanych próbkach przedstawiono na rys. 6.3.

Stanowisko do prowadzenia badań przedstawiono na rys. 6.4 i 6.5, zarówno w postaci zdjęć, jak również schematu z blokami funkcyjnymi.

W mojej opinii przedstawiona w pracy doktorskiej koncepcja budowy stanowiska pomiarowego i jej realizacja potwierdzają wysoki poziom wiedzy Doktoranta w obszarze badań laboratoryjnych, jak również w obszarze zaawansowanych technologii.

W celu obniżenia wrażliwości na zmianę tego współczynnika wszystkie próbki pokryto wysokotemperaturową farbą w kolorze matowej czerni. Zastosowanie tego typu farby pozwala ustabilizować współczynnik na poziomie ok 0,95. W zależności od wielkości próbki Doktorant zdefiniował dwa lub trzy punkty pomiarowe dla termopar. W przypadku pirometru pomiar był zawsze wykonywany na środku próbki.

W następnym kroku w zakresie budowy modeli numerycznych, w celu odwzorowania rzeczywistej geometrii (struktury) analizowanego obiektu Doktorant stwierdza, cytując: „przed przystąpieniem do budowy właściwych modeli przeprowadził próby przygotowania podstawowego modelu i dokonania kilku zmian w geometrii, które umożliwiłyby zastosowanie jego symetrii i przeprowadzenie symulacji wykorzystując jedynie jego część [87].”

W mojej opinii jest to optymalne i strategiczne podejście do procesu modelowania i optymalizacji czasu prowadzonych obliczeń.

[87] Waindok Żużalek M., Piekielny P.: *Modelling and measuring of temperature distribution in explosive clad materials under induction heating* Vol. 250, 2024, pp. 123522. (<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123522>)

Cewka ma charakter spiralny, w kontekście braku płaszczyzny symetrii, uproszczono go do postaci pojedynczych zwoi o takim samym kształcie jak pierwotna cewka i tej samej liczbie. Geometrię cewki stanowią trzy płaszczyzny i teoretycznie jest możliwa symulacja jedynie 1/8 całego obiektu, jak słusznie stwierdza Doktorant: Byłoby to prawidłowe jedynie w przypadku jednolitego wsadu, a w tym przypadku mamy do czynienia z warstwowym wsadem, co uniemożliwia uproszczenie modelu do tego stopnia. Możliwe jest wykorzystanie maksymalnie dwóch płaszczyzn symetrii - rys. 6.6. *Jest to następny strategiczny wniosek Doktoranta w zakresie budowy modeli dyskretnych dla obiektów o strukturze 3D.*

W następnym kroku procedury modelowania weryfikacji poddano: rozkłady indukcji w osi cewki, rozkłady indukcji w przekroju cewki, rozkład strat wiroprowodowych we wsadzie i wartość strat wiroprowodowych we wsadzie.

Porównanie rozkładów przedstawione na rys. 6.7 (str.72) potwierdza poprawność zaproponowanych uproszczeń. Rozkład indukcji magnetycznej w każdym z przypadków jest niemal identyczny, dotyczy także wartości maksymalnej.

Analiza porównawcza dla modeli: Model odniesienia, Model uproszczenia I i Model uproszczenia II zawiera wyniki w zakresie *Porównania rozkładu strat wiroprowodowych w próbce oraz weryfikacji poprawności przeprowadzonych uproszczeń*.

Dodatkowym istotnym wynikiem analizy porównawczej w odniesieniu do strat wiroprowodowych (Model odniesienia, uproszczenie I i uproszczenie II) jest niski poziom błędu względnego - 3.3% (Tabela 6.4).

W tabeli 0.1 przedstawiono wyniki analiz w zakresie porównania czasu obliczeń oraz wykorzystanych zasobów na kolejnych etapach uproszczeń. Istotnym wnioskiem analizy jest Uproszczenie II z wynikiem: czas obliczeń 3 min, 25 sek, 252000 elementów oraz 5.7 GB pamięci RAM, natomiast Uproszczenie I ma przewagę co do liczby elementów (znacznie większa precyzja w odwzorowaniu geometrii modelu), lecz wymaga znacznie większej pamięci RAM.

Następnym, kluczowym aspektem prowadzonych badań jest weryfikacja modelu numerycznego poprzez wykonanie pomiarów na modelu rzeczywistym (fizycznym); wyniki prowadzonych badań przedstawiono na Rys.6.8 - Próbka lp. 2 podczas procesu nagrzewania (po lewej) oraz jej model numeryczny (po prawej). Doktorant na podstawie zebranych danych z obiektu rzeczywistego przygotował modele numeryczne według schematu przedstawionego w rozdziale (rozdział 6).

Próbka lp. 1

Próbka w cewce była umieszczona na środku wysokości i długości cewki (wzbudnika). Punkty pomiarowe temperatury w symulacji zostały tak dobrane, aby jak najwierniej odpowiadały tym umieszczonym na obiekcie rzeczywistym. W przypadku rzeczywistego pomiaru temperatury, wynik uzyskany przy pomocy termopar jest pomiarem referencyjnym. Na rys. 6.9 przedstawiono rozkłady temperatury uzyskanych w drodze pomiarów i symulacji.

Jak pokazano na powyższym wykresie (rys. 6.9) oraz w Tabeli 6.6 model numeryczny dał zbliżone wyniki z pomiarami rzeczywistymi w całym procesie nagrzewania. Maksymalną rozbieżność między obliczeniami i pomiarami osiągnięto pod koniec procesu chłodzenia dla punktu pomiarowego *termopara 2* i wynosiła ona 10°C co odpowiada 5,2%, jak stwierdza Doktorant. Powyższy wynik uważam za bardzo dobry, szczególnie w kontekście „złożoności” problemu; struktury 3D wraz metodologią obliczeń rozkładów temperatury, w tym również przykładowe rozkłady temperatury w próbce oraz domenie symulacyjnej w chwili uzyskania maksymalnej temperatury - Rys. 6.10). Zestawienie wyników pomiarów i symulacji temperatury dla próbki lp. 2 przedstawiono na Rys.6.11 – osiągając wysoką zbieżność wyników; dokładność wyników pomiarów jest ściśle związana z liczbą termopar, która przekłada się na wielkość (średnicę) próbek.

Następnym istotnym krokiem w procesie modelowania 3D jest uzyskanie rozkładów temperatury (Rys. 6.12). Rys. 6.12 przedstawia rozkłady temperatury symulowanej próbki w momencie osiągnięcia maksymalnej temperatury. Zestawienie wyników pomiarów i symulacji temperatury dla próbki lp. 3 przedstawiono na Rys.6.13.

Następnym krokiem jest proces obliczeń rozkładu temperatury we wsadzie oraz jego otoczenia dla próbki lp. 3 przy maksymalnej temperaturze (rys. 6.14a i 6.14b) wyróżnia się niewielkim gradientem temperatury; wynika to z faktu, iż próbka jest zbudowana z materiałów o wysokiej przewodności cieplnej (miedź i aluminium).

Doktorant w następnym kroku procedury badań skupia się na, cytując: „Podrozdział 6.4: *„Analiza zjawisk zaobserwowanych w materiale wielowarstwowych podczas nagrzewania indukcyjnego”*”.

W kontekście prowadzonych przez Doktoranta badań istotny jest następujący wniosek: *„W przypadku materiałów jednolitych rozkład pola EM czy też prądów wirowych jest względnie prosty do przewidzenia bez przeprowadzania zaawansowanych analiz. Natomiast w materiałach wielowarstwowych nie jest to już oczywiste”*.

Dokładna analiza tych zjawisk jest możliwa dzięki wcześniej przygotowanym modelom numerycznym. Dzięki temu podejściu stworzono możliwość analizy parametrów elektrycznych dla rzeczywistego obiektu, bez konieczności przeprowadzenia bezpośredniego pomiaru. W pierwszej kolejności analizie poddano wielkość strat wirowych w kolejnych warstwach oraz ich zmiany w funkcji temperatury (tabela 6.9, str.80).

Na rys. 6.15 przedstawiono wielkość strat wirowych w funkcji temperatury dla kolejnych przeprowadzonych prób, (próbki lp-1, lp-2 i lp-3). Dla wszystkich materiałów poza tantalum, (jak stwierdza Doktorant) straty wirowe wraz ze wzrostem temperatury rosną z racji malejącej przewodności.

Kolejnym zaobserwowanym zjawiskiem przez Doktoranta jest zmiana głębokości wnikania pola EM dla niektórych specyficznych układów materiałów – jest to oczywiste zjawisko.

Dla porównania Doktorant na tym samym wykresie przedstawia również rozkład prądów wirowych w przekroju próbki lp. 1 w jednorodnym materiale z tantalu oraz Ta+Cu+304L (Rys. 0.1) oraz zwrot prądów wirowych w przekroju próbki lp. 1 (Rys. 0.2), Ta+Cu. Z kolei rozkład indukcji w przekroju próbki lp. 1 ($r=10\text{ mm}$) przedstawiono na Rys. 0.3.

Charakterystycznym zjawiskiem dla materiałów wielowarstwowych, które Doktorant zaobserwował w wyniku przeprowadzonej symulacji są nagłe skoki wartości prądów wirowych na granicy kolejnych warstw (rys. 6.17). Skoki te wynikają w oczywisty sposób z różnicy wartości przewodności każdej z warstw.

Doktorant stwierdza, iż: Zauważone skoki wartości prądów wirowych mają bezpośredni wpływ na wielkość strat wirowych. W miejscach występowania wspomnianych skoków prądu można zauważyć także lokalny wzrost strat. W klasycznym przypadku jednorodnego wsadu rozkład pól jest symetryczny. Zjawisko to przedstawiono kolejno na rys. 6.20 oraz na rys. 6.21.

W analizowanym przypadku, gdzie w jednym układzie się materiały o znaczącej różnicy przewodności symetria ta jest zaburzona. Mój komentarz jest prosty: „Fizyka zjawisk”.

Wynikiem przeprowadzonych analiz (przedstawionych na Rys. 6.22, Rys.6.23, Rys. 6.24, Rys 6.25 i Rys 6.26, Rys.6.27) jest generalny słuszny wniosek, cytuję: *„Pojawia się tutaj trudność w sformułowaniu jednoznacznych wniosków, gdyż jak wykazano wyżej, charakter danego zjawiska silnie zależy od grubości poszczególnych warstw materiału wielowarstwowego, ich parametrów elektrycznych oraz położenia względem wzbudnika.”*

Doktorant prowadząc dalsze badania i analizy podejmuje temat – Podrozdział 6.5 W ramach tego samego eksperymentu przeprowadzono także porównanie wyników pomiarów temperatury bezstykowych z pomiarami stykowymi dla dwóch przypadków: próbki surowej oraz pokrytej czarną matową farbą żaroodporną, Rys. 6.28.

Doktorant słusznie stwierdza, cytuję: *„W przypadku niemalowanej próbki można zauważyć wyraźną rozbieżność pomiarów temperatury.”*

Następne podsumowanie jest równie ważne w mojej opinii, cytuję (str. 89):

„Bezkontaktowy pomiar temperatury metali, zwłaszcza w wysokich zakresach temperaturowych, jest zadaniem problematycznym ze względu na selektywną emisyjność tych materiałów – ilość emitowanego promieniowania zależy od długości fali.

Wraz ze zmniejszaniem długości fali wzrasta emisyjność, a maleje refleksyjność powierzchni, co powinno znacząco poprawić dokładność pomiarów temperatury.”

7. Badania materiałów wielowarstwowych z warstwą ferrytyczną (str. 91 - 106)

Doktorant podsumowuje wyniki przeprowadzonych analiz, cytuję: *„Należy wyraźnie stwierdzić, iż po przeprowadzeniu pozytywnej weryfikacji pomiarowej modeli numerycznych bez warstw ferrytycznych oraz analizie zjawisk jakie zachodzą w takich materiałach przystąpiono do przygotowania modeli numerycznych dla materiałów z warstwą ferrytyczną, które są znacznie trudniejsze w symulacji opartej o metodę elementów skończonych. Obecność tej warstwy jest wymagana ze względu na docelowe przeznaczenie badanych materiałów – budowę aparatury przemysłowej nagrzewanej indukcyjnie.”*

Należy wyraźnie stwierdzić, iż materiały warstwowe przeznaczone do tego typu zastosowań muszą spełniać następujące kluczowe warunki, (ważne wnioski Doktoranta):

1. *„być dwu-lub trójwarstwowe, muszą zawierać warstwę ferrytycznego materiału, np. stal nierdzewna AISI410S, muszą posiadać dodatkową warstwę funkcjonalną odpowiedzialną za rozpraszanie ciepła, układ materiałów powinien zawierać warstwę zapewniającą odpowiednią wytrzymałość mechaniczną - funkcję tę może pełnić warstwa ferrytyczna.”*

2. przed zbudowaniem modelu numerycznego należało wyznaczyć dodatkowe parametry: *krzywą magnesowania, zmianę krzywej magnesowania w funkcji temperatury, temperaturę Curie.*

Jak słusznie stwierdza Doktorant, jednym z koniecznych parametrów do wyznaczenia jest krzywa magnesowania materiału ferrytycznego. Ponieważ podczas procesu platerowania materiał poddawany jest znacznym siłom i odkształceniom, zdecydowano o przeprowadzeniu badań dla stali AISI 410S w kilku różnych warunkach: materiał w stanie dostawy (wyżarzony), materiał o grubości 1,5 mm po procesie platerowania, materiał o grubości 3,8 mm po procesie platerowania.

Zbadano również krzywe magnesowania dla dwóch różnych grubości materiału po procesie platerowania, ponieważ różna grubość warstw wymusza zastosowanie innej ilości materiału wybuchowego, *ważny i słuszny wniosek Doktoranta.*

Próbka miała postać pierścienia o średnicy wewnętrznej 45 mm z dwoma uzwojeniami: pierwotne i wtórne, o średnicy zewnętrznej 55 mm oraz grubości zależnej od zastosowanej próbki, w Tabeli 7.1 zaprezentowano dokładne wartości poszczególnych parametrów każdej próbki. Na rys. 0.4 układ pomiarów i wyznaczania krzywej magnesowania materiału.

Z kolei na rys. 7.3 zaprezentowano wyznaczone krzywe magnesowania, natomiast na rys. 7.4 zamieszczono zależność względnej przenikalności magnetycznej w funkcji natężenia pola magnetycznego dla trzech próbek.

Jak słusznie stwierdza Doktorant, cytuję:

„Widoczny jest wyraźny wpływ procesu platerowania na kształt krzywej magnesowania próbki, która dla próbek poddanych dodatkowym naprężeniem w trakcie platerowania wybuchowego osiąga mniejsze wartości indukcji nasycenia i znacznie wyższe wartości przenikalności magnetycznej w porównaniu z próbką przed procesem platerowania.”

Istotny jest kluczowy wniosek w kontekście powyższego wniosku, cytuję: *„Wyznaczone krzywe zostały wykorzystane podczas definicji badanego materiału w środowisku symulacyjnym.”*

Kolejnym istotnym parametrem koniecznym do wyznaczenia była temperatura Curie. Dla analizowanego materiału producenci nie podają tego parametru.

Doktorant opracował „eksperyment” do jego wyznaczenia. Założono, że jedynym parametrem mającym wpływ na zmianę częstotliwości układu rezonansowego nagrzewnicy indukcyjnej jest przenikalność magnetyczna wsadu, który tak naprawdę stanowi rdzeń wzbudnika.

Eksperyment polegał na równoczesnej obserwacji zmian częstotliwości wzbudzenia w funkcji temperatury próbki – na rys. 7.5 pokazano proces obserwacji zmian obu parametrów podczas przeprowadzania eksperymentu. Proces ten powtórzono dwukrotnie dla weryfikacji powtarzalności wyników. Z kolei na Rys. 7.6 przedstawiono wykres zmian częstotliwości w funkcji temperatury z wyznaczonym punktem Curie.

Na podstawie zebranych i wyznaczonych charakterystyk możliwe było wyznaczenie zależności krzywej magnesowania w funkcji temperatury (Rys.7.7) oraz rodziny krzywych magnesowania dla charakterystycznych temperatur przedstawiono na rys. 7.8.

Doktorant wykonał badania materiałów z warstwą ferrytyczną (precyzyjne dane dotyczące przyjętych parametrów materiałowych przedstawiono w Tabeli 7.2). W celu zapewnienia nagrzewania jedynie warstwy ferrytycznej badanej próbki zastosowano wzbudnik, zaprojektowany przez Doktoranta o geometrii przedstawionej na rys. 7.10. W celu prowadzenia dalszych badań Doktorant zmodyfikował stanowisko pomiarowe (Rys.7.11). Dla tego przypadku próba nagrzewania obejmowała jedynie sam proces nagrzewania, bez chłodzenia.

Należy podkreślić, iż praktycznie w każdym procesie modelowania kluczowym aspektem jest weryfikacja modeli numerycznych, dyskretnych 2D i 3D, w wielu zagadnieniach z uwzględnieniem procesów niestacjonarnych.

Doktorant podejmuje w rozprawie doktorskiej tą tematykę, która jest jedynie słuszna i stwarza możliwość przeprowadzenia analizy porównawczej modelu numerycznego w odniesieniu do obiektu rzeczywistego (fizycznego).

Doktorant przedstawia na rys.7.12 obiekt rzeczywisty w trakcie procesu weryfikacji wraz z modelem numerycznym. Model numeryczny zawiera uproszczoną geometrię – jest to w pełni poprawne postępowanie nakierowane na poprawę dokładności struktury dyskretyzacji (siatki dyskretyzacyjnej). Przygotowany model został praktycznie uproszczony do obiektu osiowosymetrycznego. Jest to podejście w kontekście modelowania niniejszego przypadku w pełni zasadne, pozwalające na uzyskanie poprawnych wyników.

Doktorant przeprowadził proces symulacji trójwymiarowej. Model uproszczono do wycinka koła o kącie 45° (1/8 modelu). Na rys. 7.12 przedstawiono przygotowany model numeryczny w środowisku Maxwell 3D oraz obiekt rzeczywisty podczas próby nagrzewania.

Doktorant dla procesu symulacji przygotował nowy model materiałowy zawierający wcześniej przytoczoną rodzinę charakterystyk magnesowania. W celu uproszczenia obliczeń pominął niewielką zmianę częstotliwości zasilania (kilka procent), wraz ze wzrostem temperatury. Zestawienie i porównanie wyników pomiarów i symulacji temperatury próbki w czasie nagrzewania dla materiału 410S+Cu+316L przedstawiono na Rys. 7.13.

Należy podkreślić bardzo dobrą zbieżność pomiędzy wynikami pomiarów i obliczeń. Różnice pomiędzy wynikami przebiegów temperatury, pomierzonych oraz wygenerowanych w środowisku symulacyjnym nie przekraczają 1.5%.

Jak słusznie stwierdza Doktorant, cytując: *"zastosowaniu jednostronnego wzbudnika możliwe było zarejestrowanie przy pomocy kamery termowizyjnej rozkładu temperatury na całej powierzchni próbki."*

Przedstawione na rysunku 7.14 wyniki uzyskane z porównania rozkładów temperatury; zdjęcie termograficzne oraz symulacji zachowują zbliżony charakter. W mojej opinii jest to poprawny i dobry wynik.

Doktorant przeprowadził również dodatkowe pomiary i analizę zjawisk występujących w materiale wielowarstwowym (podrozdział 7.4). Wynikiem tej analizy jest istotny i w pełni poprawny wniosek, cytuję:

„Odziaływanie między warstwami w przypadku, gdy próbka zawiera materiał ferromagnetyczny, jest znacznie mniej intensywne niż dla materiałów paramagnetycznych, co wynika ze znacznie mniejszej głębokości wnikania pola EM w warstwę ferromagnetyczną.”

Analizie poddano uzyskane wartości strat wirowych w każdej z warstw. W celu weryfikacji zjawiska wybrano stal węglową o oznaczeniu AISI 1020. W wyniku przeprowadzonych symulacji stwierdzono spadek strat wirowych ze wzrostem temperatury. Doktorant stawia słuszną hipotezę, cytuję, iż: „zmiana przewodności materiału wpływa na głębokość wnikania pola EM, a tym samym na rozkład prądów wirowych, co skutkuje pracą materiału w innym punkcie krzywej magnesowania”.

Dla potwierdzenia powyższej hipotezy Doktorant przedstawia zmianę przenikalności magnetycznej w funkcji temperatury na różnych głębokościach badanego materiału – AISI 410S (Rys. 7.17). Należy stwierdzić, iż względna przenikalność magnetyczna wzrasta na niewielkiej głębokości materiału, natomiast w pozostałym obszarze przenikalność wraz ze wzrostem temperatury maleje. Wynik powyższego procesu (zjawiska) skutkuje obniżeniem wartości strat wirowych generowanych w próbce. Tłumaczy to fakt nietypowego zachowania tego materiału, jak słusznie stwierdza Doktorant.

Doktorant przedstawia wyniki porównanie rozkładu strat wirowych w przekroju próbki dla „kluczowych” temperatur materiału (Rys.7.18). Rozkład strat jest silnie zależny od temperatury materiału, wniosek poprawny, oparty o fizykę zjawisk. Do temperatury ok. 600°C większość strat jest skoncentrowana przy powierzchni próbki, jak słusznie stwierdza. Na granicy materiałów następuje skok wartości prądów wirowych, jako efekt skokowej zmiany rezystancji materiału (rys. 7.19).

8. Analiza wpływu grubości warstwy funkcjonalnej rozpraszającej ciepło na rozkład temperatury (str.107-116)

Kolejnym etapem badań, prowadzonym przez Doktoranta, cytuję: „była analiza wpływu grubości jednej z kluczowych warstw funkcjonalnych odpowiedzialnej za rozpraszanie ciepła na końcowy rozkład temperatury na powierzchni próbki”; zaletą jest fakt, iż przy niewielkich wymiarach układu grzejnego można przekazać znaczną ilość energii, natomiast wadą jest zjawisko silnego nagrzewania niewielkich obszarów. Z tego względu, jak poprawnie wnioskuje Doktorant, zastosowanie takiej warstwy pośredniej jest wręcz konieczne.

W przedstawionych wynikach badań rolę warstwy funkcjonalnej pełni miedź, jako materiał o jednym z najwyższych współczynniku przewodności cieplnej. Mając na uwadze potencjalne wdrożenie takiego materiału, poza skutecznością działania, należy rozważyć poziom kosztów dla potencjalnego klienta.

W związku z powyższymi uwagami/wnioskami Doktorant przeprowadził analizę wpływu grubości tej warstwy na rozkład temperatury w celu ograniczenia potencjalnych kosztów materiału (str.107).

W tabeli 8.1 przedstawiono dane dotyczące przyjętych wartości parametrów dla predefiniowanych materiałów (410S, Ta i C10200). Wytypowane próbki ze zmienną grubością warstwy miedzi zaprezentowano na Rys. 8.1.

Kolejny etapem prowadzonych badań była weryfikacja zaimplementowanego modelu numerycznego w kontekście jego poprawności (podrozdział 8.2 - *Weryfikacja pomiarowa modelu numerycznego*). Model został uproszczony do 1/4 3D struktury obiektu, w celu lepszego zobrazowania rozkładu temperatury na powierzchni próbki.

Na rys. 8.4 Doktorant przedstawia model numeryczny oraz obiekt rzeczywisty na stanowisku pomiarowym. Model numeryczny zawiera: badaną próbkę oraz predefiniowany model numeryczny. Z kolei rozkład strat wiropądowych w próbce, wybrano jeden rozkład strat wiropądowych - dla pozostałych próbek jest on praktycznie identyczny i jest głównie skupiony w połowie promienia próbki – rys. 8.5.

Na rys. 8.6 przedstawiono zestawienie pomiarów i symulacji temperatury próbek o różnych grubościach warstwy.

Z kolei w Tabeli 8.2 (str. 112) porównano wyniki w wybranych chwilach czasowych dla próbek o różnej grubości warstwy miedzi. Różnica temperatur między cieplejszym punktem (Sp3) dla pomiarów, a punktem chłodniejszym (Sp1) „jest podobna” w przypadku pomiarów, jak również dla przeprowadzonych obliczeń.

Najlepszą jednorodność rozkładu temperatury, Poprawny Wniosek Doktoranta, cytuję: uzyskuje się w przypadku próbki o największej grubości warstwy miedzi. Środkowa część próbki nadal pozostaje lekko niedogrzana, lecz różnica ta jest znacząco mniejsza niż dla poprzednich próbek - różnica między punktami pomiarowymi Sp1 i Sp3 wynosi jedynie 6°C (5°C symulacja). Względem materiału wyjściowego jest to czterokrotnie mniejsza różnica, natomiast względem próbki o grubości miedzi 1,5 mm różnica ta jest dwukrotna.

Z kolei na rys. 8.7 przedstawiono różnice w rozkładach temperatury dla modelu i rzeczywistych pomiarów. Wniosek Doktoranta; cytuję: „*Im grubsza warstwa miedzi, tym lepsza jednorodność rozkładu temperatury*”, jest w pełni poprawny.

Istotny jest również wniosek Doktoranta jako wynik analizy, cytuję (str.113): „*Dla bardziej precyzyjniej oceny jednorodności rozkładu temperatury ustalono wskaźnik jakościowy – odchylenie standardowe. Parametr ten jest jednym z podstawowych statystycznych wskaźników zmienności danych określający jak bardzo zbiór danych odbiega od wartości średniej.*”

Kolejny wniosek Doktoranta ma również swoją „wagę merytoryczną”, Cytuję:

„Na rys. 8.8a (str.114) przedstawiono zmianę średniej temperatury powierzchni dla każdej próbki, natomiast na rys. 8.8b (str.114) jej odchylenie standardowe. Jak wynika z wykresu średnich temperatur próbek, po upływie tego samego względnego czasu nagrzewania osiągają one takie same temperatury. Jak wynika z wykresu średnich temperatur próbek, po upływie tego samego względnego czasu nagrzewania osiągają one takie same temperatury, np.: w połowie procesu nagrzewania.”

W tabeli 8.3 (str.114) zaprezentowano wyniki analiz, oraz porównano wyniki szacowanych przedziałów temperatury powierzchni próbki, które różnią się istotnie. Doktorant słusznie stwierdza iż, cytuję: *”Wybór zależy od docelowego zastosowania i wymagań stawianym materiałowi”*. Następna konkluzja jest równie ważna (strategiczna), cytuję: *„Dodatkowo powinno zwrócić się uwagę na koszty materiału, które rosną wraz z grubością miedzi. W takiej sytuacji ostateczne decyzja niejednokrotnie zależy od zamawiającego i jego oczekiwań. Istotnym jest fakt, iż aluminium odznacza się prawie dwukrotnie mniejszym współczynnikiem przewodzenia ciepła”*.

Kolejnym strategicznym zagadnieniem jest fakt, iż całe generowane straty występują w cienkiej warstwie zaraz przy powierzchni próbki; (strategiczne, w pełni poprawne podsumowanie, zdefiniowane przez Doktoranta), cytuję: *”Dlatego też rodzaj/grubość kolejnych warstw nie ma znaczenie dla wielkości strat, co pokazano także w tabeli 8.4 - Wielkość strat wiroprowodowych w poszczególnych warstwach w kolejnych próbkach , (str. 115)”*.

9. Zagadnienie projektowania cewek

Oddzielnym istotnym zagadnieniem projektowania układów nagrzewania indukcyjnego jest projektowanie wzbudników. W pracy przedstawiono proces projektowania induktorów dla dwóch, relatywnie prostych geometrii wsadu (Rys.9.1. i Rys.9.2).

Jak słusznie stwierdza Doktorant (analiza i wnioski Doktoranta, str. 117), cytuję: *„W celu umożliwienia wykorzystania nagrzewania indukcyjnego w procesie tłoczenia stempel i matryca zostały wykonane z ceramiki, a konkretnie z tlenku aluminium”*.

Doktorant przeprowadził analizę na podstawie oceny rozkładu strat wiroprowodowych oraz ich wartości całkowitej. Dla obiektu 1 (rys. 9.1) przygotowano 9 różnych, relatywnie prostych wariantów układów wzbudników, przedstawionych na rys. 9.3. Jako materiał wsadu przyjęto austenityczną stal nierdzewną AISI 304L. W docelowej aplikacji wsad wykonano z materiału wielowarstwowego zawierającego warstwy materiału ferromagnetycznego. Rozkłady strat wiroprowodowych dla rozpatrywanych struktur koncepcji wzbudnika przedstawiono na rysunku 9.4; jest to precyzyjna prezentacja.

W tabeli 9.1 przedstawiono zestawienie wielkości strat wiroprowodowych dla kolejnych dziewięciu wariantów układów wzbudników. Najbardziej rokującymi wariantami były te z przeciwległymi cewkami cylindrycznymi oraz płaskimi w osi próbki; słuszny wniosek Doktoranta. Docelową strukturą jest variant VII - cewka cylindryczna możliwie blisko nagrzewanego elementu.

Rozkład strat wiropądowych dla tego wariantu przy zastosowaniu materiału bliższemu docelowemu przedstawiono na rys. 9.5.

Finalną geometrię układu cewek, projekt Doktoranta, przedstawiono na rys. 9.7. Wymiary oraz rozmieszczenie zaprojektowanego układu wzbudnika dla obiektu 1 przedstawiono na rys. 0.5. Pierwszym wariantem jest cewka dopasowana do kształtu czaszy, przedstawiona na rys. 9.9 wraz z rozkładem strat wiropądowych (rys. 9.10).

Przy założeniu wartości prądu wzbudnika 1000 A straty wiropądowe we wsadzie są o wartości 10960 W. Doktorant w celu wyeliminowania tzw. zimnego punktu dokonał „obrotu głównej osi pola elektromagnetycznego o 90°; w celu wymuszenia innej drogi przepływu prądów wirowych. Doktorant koncepcję tego wzbudnika, *wariant II*, przedstawił na rys. 9.11, natomiast rozkład strat wiropądowych dla formowanej próbki – wariant II przedstawiono na rys. 9.12.

„Obrót osi wyeliminował zimny punkt na środku próbki, lecz równocześnie na brzegach próbki powstał znaczny gradient strat, co może prowadzić do lokalnego przegrzania próbki, szczególnie jeśli to zjawisko występuje na jej krawędzi. W tym przypadku straty wiropądowe znacząco zmalały w porównaniu do poprzedniego wariantu”; poprawny wniosek Doktoranta.

„Kolejny wariant to klasyczna cylindryczna cewka (rys. 9.13), która przy odpowiedniej długości charakteryzuje się stosunkowo jednolitym rozkładem pola w jej wnętrzu”, jak słusznie stwierdza Doktorant. Rozkład strat wiropądowych dla formowanej próbki (rys. 9.14 – wariant III dla częstotliwości 25 kHz (u góry) oraz 5 kHz (u dołu). Kolejną koncepcję wzbudnika do nagrzewania próbki w wersji przemysłowej przedstawiono na rys. 9.15, natomiast rozkład strat wiropądowych dla formowanej próbki przedstawiono na rys. 9.16.

Wizualizację wariantu IV układu wzbudników dostosowanej do docelowej aplikacji, Doktorant przedstawił na rys. 9.17, natomiast rzeczywisty układ wzbudników do nagrzewania próbki podczas formowania w skali przemysłowej przedstawiono na rys. 9.18, przy zasilaniu z jednej nagrzewnicy indukcyjnej.

10. Opis wdrożonych wyników pracy doktorskiej

Istotnym osiągnięciem Doktoranta są również przedstawione w pracy przykładowe wdrożenia w oparciu o prowadzone badania, zawarte w pracy:

- 1. Topielnik wosku nagrzewany indukcyjnie.** *Projekt został zrealizowany przy współpracy z francuską ID Partner, która była odbiorcą projektowanego urządzenia, (opis urządzenia wraz z funkcjonalnościami, str. 129-131),*
- 2. Naczynia typu WOK.** Realizacja jest oparta na materiale 410S + Cu (1 + 2 mm) w celu „produkcji 32 szt. prototypowych naczyń typu WOK do przemysłowego robota kuchennego, gdzie jest wykorzystywane nagrzewanie indukcyjne”, *(opis urządzenia wraz z funkcjonalnościami, str. 131-133),*
- 3. Kocioł grzewczy do procesów destylacji.** *W ramach współpracy z firmą ID Partner podjęto rozmowy o możliwościach zastosowania materiałów wielowarstwowych oraz nagrzewania indukcyjnego w produktach firmy Chavignac Group zajmującej się projektowaniem oraz produkcją aparatury przemysłowej do destylacji alkoholi, str. 133-135.*

10. Podsumowanie

Cytuję opinię Doktoranta o własnych dokonaniach w kontekście zrealizowanych badań i wdrożeń: „Prezentowana praca poza aspektem naukowym wyróżnia się także potencjałem wdrożeniowym uzyskanych wyników. W związku z tym, równolegle z pracami naukowymi prowadzone były prace wdrożeniowe wykorzystujące zdobytą wiedzę.”

Mój komentarz jest następujący: Zgodnie z aktami prawnymi Rada Dyscypliny powołuje recenzentów rozprawy w celu przedstawienia opinii o wartości naukowej i wdrożeniach zrealizowanych przez Doktoranta. *W mojej opinii zawarcie w treści rozprawy własnego poglądu (opinii) na temat wartości rozprawy traktuję, jako nietakt.*

Należy podkreślić duży wkład i wiedzę Doktoranta w zakresie teorii i praktyki w procesach nagrzewania. W wyniku przeprowadzonej analizy Doktorant słusznie stwierdza, iż w celu umożliwienia wykorzystania nagrzewania indukcyjnego w procesie tłoczenia stempel i matryca zostały wykonane z ceramiki, praktycznie z tlenku aluminium.

W mojej opinii jest to w pełni poprawny proces modelowania z wykorzystaniem szerokiego spektrum danych i zaawansowanego oprogramowania, tej klasy, jak FLUENT, ANSYS, Maxwell (oprogramowanie 2D/3D).

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska znajduje się w głównym nurcie współczesnego projektowania przetworników elektromechanicznych /elektromagnetycznych, jak również zaawansowanych systemów elektromagnetycznych z wykorzystaniem nowoczesnych technik komputerowych.

Powyższą analizę, wraz w pełni poprawnymi wynikami obliczeń, należy uznać za istotne osiągnięcie Doktoranta w obszarze badań nakierowanych na uzyskanie stopnia doktora w dziedzinie nauk technicznych.

W pracy zawarto 81 pozycji literatury – poprawnie dobranych w kontekście prowadzonych badań w ramach przygotowywanej rozprawy doktorskiej.

Konkluzja recenzji

Należy wyraźnie stwierdzić, iż zainteresowanie tą tematyką wielu ośrodków badawczych dodatkowo potwierdza jej aktualność.

Tematykę rozprawy uważam za w pełni aktualną i nowoczesną. Szerokie spektrum problemów, które pojawiły się w trakcie wykonywania badań, jak również aktualność tej tematyki z punktu widzenia technicznego gwarantują, iż badania te będą kontynuowane w przyszłości.

3. Ocena merytoryczna rozprawy

Przedstawiona praca została przygotowana jako **praca promocyjna (doktorska)**. Praca składa się z ośmiu rozdziałów podstawowych, podsumowania i spisu literatury (81 pozycji, w tym 11 prac własnych Doktoranta).

Recenzowaną pracę zaliczam do grupy prac interdyscyplinarnych łączących w sobie wiedzę z technik komputerowych/informatycznych, jak również przetworników elektromechanicznych.

Praca jest nakierowana na rozwiązanie konkretnego problemu naukowego i technicznego, natomiast zastosowane narzędzia, jakimi są techniki komputerowe są podporządkowane temu celowi. Takie postawienie problemu uważam za w pełni poprawne i nowoczesne. Autor posługuje się nowoczesnym narzędziem z dziedziny oprogramowania, mianowicie pakietem Maxwell i Fluent. Opanowanie tych narzędzi przez Doktoranta jest wzorcowe.

Praca jest skonstruowana poprawnie, zawiera obszerny wstęp wraz z omówieniem stanu wiedzy, wyraźnie sformułowane cele i kierunki badań oraz poprawnie postawione tezy pracy.

W wyniku prowadzonych badań, analiz i symulacji tezy I i II zostały udowodnione.

Teza I – Analiza polowa umożliwia na etapie projektowania, wyznaczenie poprawnego rozptywu prądów wirowych, strat mocy oraz temperatury w materiale warstwowym wytworzonym metodą platerowania wybuchowego,

Teza II - Możliwe jest zaprojektowanie i wykonanie układu wzbudników dedykowanych dla grzania materiałów wielowarstwowych łączonych wybuchowo, w tym, w technologicznych procesach ich przetwarzania.

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska znajduje się w głównym nurcie współczesnego projektowania urządzeń elektrotechnicznych za pomocą technik komputerowych należących do elektromagnetyzmu obliczeniowego.

Tak sformułowane tezy stanowią pewien imperatyw, który został w pracy udowodniony. Polecam moją propozycję uwadze Doktoranta. Powyższe uwagi nie podważają w żaden sposób postawionej w pracy tezy, lecz jedynie wyrażniej ją precyzują.

Rozdziały 3, 4, 5, 6, 7 i 8 stanowią własny wkład Doktoranta. Jest to niewątpliwie osiągnięcie Doktoranta i stanowi samodzielne rozwiązanie poprawnie postawionego zadania badawczego. Przedstawione wyniki symulacji oraz ich porównanie z wynikami pomiarów potwierdzają poprawność zaproponowanego podejścia.

Stwierdzam, iż wnioski (podsumowanie) z przeprowadzonej w pracy kompleksowej analizy polowo-obwodowej, zawarte w rozdziale 9, są sformułowane poprawnie i dowodzą poprawności postawionej tezy i realizacji celów pracy.

Uwagi ogólne

Na podkreślenie zasługuje bardzo precyzyjny i czytelny sposób prezentacji wyników oraz bardzo dobra strona graficzna pracy.

5. Uwagi szczegółowe

W pracy znalazłem jedynie drobne błędy edytorskie, które nie wpływają na moją pozytywną ocenę pracy, nie będę więc ich zamieszczał.

6. Konkluzja recenzji

Stwierdzam, iż praca jest napisana bardzo starannie, układ pracy jest precyzyjny i logiczny, strona graficzna pracy jest wręcz wzorowa. Wnioski końcowe uzyskane w pracy są poprawne i interesujące.

Przedstawione powyżej uwagi ogólne i szczegółowe nie obniżają mojej wysokiej oceny rozprawy doktorskiej. Wyniki rozważań zawarte w pracy upoważniają do stwierdzenia, iż zostały udowodnione tezy rozprawy oraz osiągnięto założone cele pracy.

Przedstawiona rozprawa dowodzi, że Doktorant umie korzystać z najnowszej literatury w obranej dziedzinie wiedzy, podchodzi do niej krytycznie a ponadto potrafi twórczo rozwijać osiągnięcia innych autorów.

Doktorant wykazał się bardzo dobrą znajomością nowoczesnej metodyki modelowania złożonych obiektów fizycznych, metod numerycznych i technik programowania. Uważam, że praca stanowi samodzielne rozwiązanie przez Autora szeregu zagadnień naukowych przy użyciu nowoczesnych metod badawczych.

Stwierdzam, iż przedstawiona rozprawa p.t.” GRZANIE INDUKCYJNE MATERIAŁÓW WARSTWOWYCH ŁĄCZONYCH WYBUCHOWO” autorstwa mgr inż. Michała ŻUŻAŁKA stanowi samodzielne rozwiązanie zadania badawczego i spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim przez Ustawę o Tytule Naukowym i Stopniach Naukowych.

Podstawa Prawna: Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U 2024, poz.1571).

W związku z powyższym stawiam wniosek o przyjęcie przedstawionej pracy jako rozprawy doktorskiej i dopuszczenie jej Autora Pana mgr inż. **Michała ŻUŻAŁKA** do publicznej obrony pracy.



prof. dr hab. inż. Sławomir Wiak, *dr h.c.*

Łódź, 06-07-2026 r.

prof. dr hab. inż. Sławomir Wiak, *dr h.c.*
Instytut Mechatroniki i Systemów Informatycznych
Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki
Politechnika Łódzka

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała ŻUŻAŁKA

Wniosek dodatkowy

Biorąc pod uwagę wysoki poziom merytoryczny pracy (zastosowane zaawansowane metody modelowania i symulacji komputerowych), nowoczesność podjętej tematyki, bardzo ciekawe wyniki badań, precyzyjnie sformułowane wnioski końcowe oraz wzorcową stronę graficzną pracy uważam recenzowaną pracę za wyróżniającą.

Zgłaszam wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej p.t. " GRZANIE INDUKCYJNE MATERIAŁÓW WARSTWOWYCH ŁĄCZONYCH WYBUCHOWO " autorstwa Pana mgr inż. Michała Żużalka.



prof. dr hab. inż. Sławomir Wiak, *dr h.c.*