

GRZANIE INDUKCYJNE MATERIAŁÓW WARSTWOWYCH ŁĄCZONYCH WYBUCHOWO

Wprowadzenie

Nagrzewanie indukcyjne współcześnie znajduje wiele zastosowań w szeroko rozumianym przemyśle z racji swojej charakterystyki pracy i unikalnym cechom. Przede wszystkim nagrzewanie odbywa się w sposób bezkontaktowy, a energia cieplna jest generowana bezpośrednio w obrabianym detalu. Równocześnie dzięki temu proces nagrzewania osiąga wysoką sprawność, a możliwość precyzyjnego sterowania mocą nagrzewania/temperaturą detalu pozwala na pełną kontrolę nad prowadzonym procesem. Te zalety spowodowały, że nagrzewanie indukcyjne znalazło zastosowanie w wielu branżach – od przemysłu maszynowego i motoryzacyjnego, przez energetykę i eksperymentalną medycynę, po sektor spożywczy. Rozwój elektroniki w dziedzinie elementów półprzewodnikowych pozwolił na znaczące zmniejszenie gabarytów urządzeń, czego dowodem są wykorzystane w pracy nagrzewnice indukcyjne.

Równolegle dzięki coraz bardziej rozbudowanym i dokładniejszym środowiskom symulacyjnym możliwe jest przewidzenie lub też zaprojektowanie całego procesu, w tym przypadku nagrzewania indukcyjnego detalu o wybranej geometrii. W wielu przypadkach takie podejście może zastąpić przygotowywanie kosztownych prototypów urządzeń na wczesnym etapie projektu, gdzie często występują liczne błędy projektowe. Takie podejście przekłada się bezpośrednio na znaczne oszczędności.

Mimo licznych wcześniej wspomnianych zalet nagrzewania indukcyjnego posiada ono pewną wadę – przy nagrzewaniu większych obszarów, z racji charakteru pola EM, mogą powstawać cieplejsze i chłodniejsze obszary. Rozwiązaniem tego problemu jest tutaj wykorzystanie materiału wielowarstwowego, który równocześnie umożliwia wykorzystanie nagrzewania indukcyjnego (warstwa ferrytyczna), zapewnia wysoką przewodność cieplną oraz pozwala na kontakt z obrabianym medium.

Technologia platerowania wybuchowego stosowana do produkcji materiałów warstwowych ma swoje początki w latach 50. i 60 ubiegłego wieku. Sama idea technologii pozostała właściwie niezmienna po dzisiejsze czasy. Niemniej jednak jej cechy są bardzo pożądane we współczesnym przemyśle między innymi dzięki możliwości łączenia różnych metali (o różnych właściwościach) w jeden trwały układ materiałów. W niektórych konstrukcjach znalezienie stopu metali spełniającego liczne silnie rozbieżne wymagania jest trudne lub bardzo kosztowne. Przykładem może być wykonanie elementu z kosztownych materiałów np. tytanu, w celu spełnienia tylko jednego wymogu (np. odporności na warunki morskie). Rozwiązaniem jest tutaj zastosowanie podstawowej warstwy konstrukcyjnej ze stali węglowej i pokrycie jej znacznie cieńszą warstwą tytanu, co pozwala znacząco obniżyć koszty produkcji.

Charakterystyka problemu badawczego

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury nie znaleziono informacji na temat połączenia dwóch wymienionych technologii (grzania indukcyjnego i platerowania wybuchowego). W związku z powyższym postanowiono uzupełnić wiedzę w tym zakresie, ponieważ wstępne badania wykazały istnienie zjawisk, których nie zauważono podczas

nagrzewania wsadów jednolitych. Dodatkowo podczas wykonanego przeglądu literatury w zakresie nagrzewania indukcyjnego i jego modelowania zauważono pewne zaniedbania bądź nieścisłości w analizowanych pracach. Były to między innymi:

- weryfikacja jedynie w wąskim zakresie temperatury,
- niesprecyzowanie uwzględniania zmienności parametrów materiałowych,
- brak weryfikacji procesu chłodzenia.

Poprawne przygotowanie modelu numerycznego nagrzewania indukcyjnego wymagało wzięcia pod uwagę szeregu zjawisk, które występują w tym procesie. Kluczowym elementem było pozyskanie parametrów materiałowych tj. przewodność elektryczna i cieplna, ciepło właściwe, charakter zmian parametrów pod wpływem wzrostu temperatury. Bez uwzględnienia wymienionych zjawisk modele numeryczne nie osiągnęłyby satysfakcjonującej dokładności. W pracy wykorzystano materiały, także ferrytyczne, które nie są zwyczajowo wykorzystywane w elektrotechnice, co dodatkowo utrudniało pozyskanie magnetycznych parametrów materiałowych, które są istotne z punktu widzenia przygotowywanych symulacji numerycznych.

W badaniach wykorzystywano materiały o zróżnicowanych parametrach elektrycznych co prowadziło do niejednorodnego rozkładu prądów i temperatur, zależnego od grubości oraz własności każdej z warstw. Przeprowadzona analiza tych materiałów jest oryginalna w skali światowej.

Cel pracy i zakres prowadzonych badań

Głównym celem rozprawy było zbadanie zjawisk zachodzących podczas nagrzewania indukcyjnego materiałów warstwowych łączonych wybuchowo, ze szczególnym uwzględnieniem ich specyficznej budowy i właściwości zmiennych w funkcji temperatury. Ze względu na ograniczoną liczbę publikacji w tym obszarze, praca miała charakter pionierski oraz obejmowała zarówno modelowanie numeryczne jak i część eksperymentalną.

Cele pośrednie obejmowały: analizę literatury, dobór próbek, pozyskanie charakterystyk materiałowych (np. krzywych magnesowania), budowę modeli numerycznych w środowisku ANSYS oraz zaprojektowanie i wykonanie stanowisk pomiarowych. Uwzględniono zarówno układy z warstwami ferromagnetycznymi, jak i bez nich, co pozwoliło na ocenę wpływu tych cech na dokładność odwzorowania procesu grzania. Zdobytą w trakcie prowadzonych badań wiedzę wykorzystano do projektowania układów materiałów wielowarstwowych i układów nagrzewania dla konkretnych aplikacji przemysłowych.

Metodologia badawcza

Sprężone symulacje numeryczne oparte na metodzie elementów skończonych stanowiły podstawowe narzędzie analizy. Zbudowane modele numeryczne w związku z tym wykorzystywały dwa moduły oprogramowania ANSYS – Maxwell 3D oraz Fluent. W pierwszym module była przeprowadzana symulacja rozkładu strat wirowych, natomiast w drugim był obliczany rozptyw ciepła oraz temperatura badanej próbki. Sprężone symulacje pozwoliły na uwzględnienie zmian parametrów materiałowych. Dzięki temu było możliwe uwzględnienie charakterystycznego punktu dla ferromagnetyków jakim jest temperatura (punkt) Curie.

Z racji braku dostępności krzywej magnesowania wykorzystanej stali nierdzewnej AISI 410S, wyznaczono ją samodzielnie w ramach dodatkowych badań. Opracowano także autorską metodą określania zmian kształtu krzywej magnesowania po wpływie wzrostu temperatury wraz z wyznaczeniem temperatury Curie. Badane materiały wielowarstwowe podzielono na dwie grupy: układy nie zawierające warstw ferrytycznych oraz te z warstwami ferrytycznymi. Stopniowe zwiększanie złożoności umożliwiło kalibrację częściowych modeli na podstawie pomiarów i sukcesywne poprawianie dokładności symulacji na dalszych etapach.

W eksperymentalnej części pracy przeprowadzono weryfikację pomiarową w zakresie rozkładu temperatury na powierzchni próbki oraz punktowych pomiarach dla każdego przygotowanego modelu numerycznego. W badaniach wykorzystano w trzy metody pomiaru temperatury:

- termopary typu K – jako pomiar referencyjny,
- pirometr przemysłowy,
- kamera termowizyjna.

Zebrane wyniki porównywano z uzyskanymi w drodze symulacji oraz oceniano ich dokładność i poprawność. Sprawdzone także wpływ stanu powierzchni próbki na dokładność pomiarów bezstykowych.

Przeprowadzone badania

W pracy zaplanowano trzy główne drogi badawcze bezpośrednio powiązane z wcześniej określonymi grupami materiałów:

- a) modelowanie oraz weryfikacja pomiarowa układów wielowarstwowych bez warstw ferrytycznych,
- b) modelowanie oraz weryfikacja pomiarowa układów wielowarstwowych z warstwami ferrytycznymi,
- c) analizy wpływu grubości warstwy rozpraszającej ciepło na rozkład temperatury.

Do pierwszej części badań wytypowano układu materiałów o zróżnicowanych parametrach materiałowych i geometrycznych w celu sprawdzenia poprawności modeli numerycznych dla różnych przypadków. W eksperymencie wykorzystano wzbudnik o kształcie zbliżonym do spłaszczonego cylindra. Na podstawie weryfikacji pomiarowej, stwierdzono, że przygotowane modele numeryczne wykazały wysoką dokładność na poziomie 1% dla wybranych przypadków. Przeprowadzono także dodatkową analizę numeryczną rozkładu parametrów w przekroju próbki, która wykazała szereg nietypowych zachowań obserwowanych parametrów. W pracy podjęto także próbę wyjaśnienia tych zjawisk.

Kolejnym etapem pracy było podjęcie próby zamodelowania nagrzewania indukcyjnego materiału wielowarstwowego zawierającego warstwy ferrytyczne. Z racji intensywnego zjawiska naskórkowości w materiałach ferrytycznych należało zaimplementować dodatkowe mechanizmy dyskretyzujące oraz uproszczenia geometrii w celu uzyskania siatki dyskretyzacyjnej odpowiedniej rozdzielczości zapewniającej poprawne przeprowadzenie symulacji. Dodatkowo na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury zauważono, że pod wpływem dużych odkształceń materiał taki może zmienić swoje właściwości magnetyczne. Stąd też sprawdzono wpływ procesu platerowania na zmienność krzywej magnesowania. Weryfikacja pomiarowa modeli numerycznych potwierdziła prawidłowość przyjętych założeń,

a model osiągnął oczekiwaną dokładność. Zaproponowany model numeryczny zachował poprawność w całym analizowanym zakresie wraz z odzwierciedleniem zjawiska utraty właściwości magnetycznych powyżej temperatury Curie.

W ramach badań przeprowadzono także analizę wpływu grubości warstwy rozpraszającej ciepło na końcowy rozkład temperatury na powierzchni próbki. Z racji wdrożeniowego charakteru pracy rozważenia te miały na celu między innymi ograniczenie niepotrzebnych kosztów. Ponownie przeprowadzono badania numeryczne i eksperymentalne dla trzech wariantów grubości warstwy funkcjonalnej wykazując, że większa grubość poprawia jednorodność temperatury na powierzchni próbki, ale równocześnie podnosi koszt wytworzenia takiego materiału. Przeprowadzona analiza pozwoliła wskazać kompromis między efektywnością cieplną, a opłacalnością konstrukcyjną rozwiązania.

W ramach badań zajęto się także zagadnieniem projektowania cewek dla przestrzennych geometrii z wykorzystaniem materiałów wielowarstwowych z uwzględnieniem ograniczeń geometrycznych i technologicznych na rzeczywistych przykładach. Przeanalizowano wpływ rozmieszczenia zwojów na efektywność nagrzewania i rozkład strat wiroprowodowych. Na tej podstawie zaproponowano rozwiązania zapewniające skuteczne i równomierne grzanie.

Praktyczny aspekt przeprowadzonych badań

Celem aplikacyjnym pracy było opracowanie i wdrożenie rozwiązań umożliwiających praktyczne wykorzystanie nagrzewania indukcyjnego w materiałach wielowarstwowych łączonych metodą platerowania wybuchowego. W oparciu o zweryfikowane modele numeryczne oraz analizę właściwości cieplno-elektromagnetycznych tych materiałów, zaprojektowano i zrealizowano trzy zastosowania przemysłowe: topielnik wosku, naczynie typu WOK oraz kocioł do destylacji alkoholi. Każde z tych urządzeń wykorzystuje zalety struktury warstwowej – m.in. skuteczność grzania warstwy ferromagnetycznej i przewodność cieplną warstwy miedzianej – co pozwoliło uzyskać bardziej jednorodny rozkład temperatury, wyższą efektywność energetyczną oraz lepsze parametry użytkowe. Wyniki pracy znalazły tym samym bezpośrednie przełożenie na praktykę inżynierską, wspierając rozwój rzeczywistych urządzeń grzewczych i potwierdzając przydatność zaproponowanych modeli w projektowaniu systemów nagrzewania indukcyjnego.

Podsumowanie

W rozprawie potwierdzono wysoką przydatność nagrzewania indukcyjnego jako nowoczesnej, energooszczędnej technologii o rosnącym znaczeniu przemysłowym. Przeprowadzona analiza wykazała, że w przypadku materiałów wielowarstwowych – zwłaszcza łączonych wybuchowo – poprawne modelowanie wymaga uwzględnienia zmian właściwości materiałowych wraz ze wzrostem temperatury. Opracowane i zweryfikowane modele numeryczne pozwoliły na wiarygodne odwzorowanie procesu grzania, w tym wpływu geometrii oraz składu warstw na rozkład prądów wirowych i temperatury. Eksperymentalna walidacja modeli wykazała wysoką zgodność wyników obliczeń z rzeczywistymi pomiarami. Zidentyfikowano również istotne zjawiska zachodzące na granicach warstw materiałów, wpływające na głębokość wnikania pola elektromagnetycznego i lokalizację strat wiroprowodowych. Uzyskane wyniki stanowią nie tylko wkład poznawczy, ale też podstawę do projektowania efektywnych urządzeń grzewczych i dalszych prac rozwojowych.