

JERZY ZGRAJA

Instytut Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej

WPŁYW CZĘSTOTLIWOŚCI NA INTENSYWNOŚĆ NAGRZEWANIA WZBUDNIKIEM CYLINDRYCZNYM KRAWĘDZI WKŁĘŚLYCH I WYPUKŁYCH FRAGMENTÓW WSADU

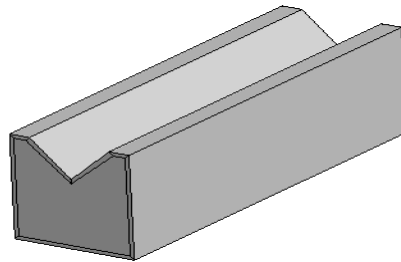
Jednym ze sposobów korygowania rozkładu temperatury powierzchni nagrzewanego wsadu o złożonych kształtach jest zmiana częstotliwości źródła zasilania. Metoda ta umożliwia uzyskanie dużej równomierności nagrzewanie powierzchni wsadów wkłęsło-wypukłych, jak np. koła zębate. Prowadzi ona do relatywnie prostej konstrukcji wzbudnika, np. wzbudnika cylindrycznego. W pracy, wykorzystując symulacje 3D pola elektromagnetycznego i sprzężonych pól elektromagnetycznego i temperatury, przeanalizowano powyższe zjawisko dla przypadku nagrzewania matrycy do zaginarki.

WPROWADZENIE

W nagrzewaniu indukcyjnym występuje silny związek między kształtem wsadu a równomiernością jego nagrzewania. Jest to szczególnie zauważalne i często technologicznie uciążliwe dla wsadów o skomplikowanych kształtach, odbiegających od klasycznego kształtu walcowego. Dodatkowy problem stanowią tu fragmenty wsadu w pobliżu jego krawędzi. Precyzyjne, bazujące na symulacjach komputerowych, kształtowania rozkładu pola magnetycznego wzbudnika drogą doboru jego kształtu oraz boczników magnetycznych pozwala zwykle uzyskać żadaną równomierność nagrzewania wsadu. Równomierność ta dotyczy jednak tego konkretnego wsadu i przy jego zmianie problem nierównomierności nagrzewania powraca. W zastosowaniach przemysłowych określona nagrzewnica indukcyjna jest bardzo często wykorzystywana do nagrzewania całego zestawu, typoszeregu wsadów. Z technologicznego punktu widzenia, oczekiwana jest więc możliwie duża uniwersalność danego wzbudnika, nawet kosztem pewnego zmniejszenia sprawności układu. Omawiane zagadnienie

szczególnie wyraźnie występuje przy nagrzewaniu wsadów posiadających zarówno wypukłe, jak i wklęsłe fragmenty powierzchni zawierające krawędzie, jak np. koła zębate. Dla tego typu wsadów jednym z możliwych rozwiązań uzyskiwania równomierności nagrzewania przy małej wrażliwości na kształt wsadu jest wykorzystywanie wzbudników cylindrycznych zasilanych prądem o odpowiednio dobranej częstotliwości.

W prezentowanej pracy przeanalizowano powyższe zagadnienie dla przykładu nagrzewania matrycy o kształcie przedstawionym poglądowo na rys. 1. Matryce tego typu są używane w urządzeniach do zaginania blach i posiadają krawędzie zarówno na części wypukłej, jak i wklęsłej. Procesowi hartowania podlega część matrycy zawierająca oba te fragmenty, co powoduje konieczność ich równomiernego nagrzewania. Nagrzewanie pozostałych części matrycy, które nie są hartowane, nie jest wprawdzie wymagane, ale zmniejsza efekt krzywienia oraz ogranicza naprężenia.



Rys. 1. Analizowany kształt wsadu z krawędziami w części wypukłej i wklęsłej

Analizowanie zjawisk elektromagnetyczno-cieplnych z punktu widzenia równomierności nagrzewania wsadów wklęsło-wypukłych o kształtach jak na rys. 1 dotyczy zasadniczo dwuwymiarowego rozkładu pola elektromagnetycznego i pola temperatury w jego przekroju poprzecznym. Tego typu nagrzewanie, szczególnie hartowanie, jest realizowane zwykle w posuwie i zagadnienie równomierności nagrzewania w kierunku ruchu można tu traktować jako osobny problem naukowo-techniczny. W prezentowanej pracy zagadnienie to nie będzie omawiane, a nagrzewanie zostanie potraktowane jako nagrzewanie bez wzajemnego ruchu wsadu i wzbudnika. Przy takim podejściu problem można, od strony symulacyjnej, widzieć jako zagadnienie 2D lub 3D. W polowych zagadnieniach elektromagnetycznych układów wzbudnik-wsad (UWW) przyjęto traktować rozważany problem jako 2D, jeśli może on być opisany przy wykorzystaniu jedynie jednej składowej analizowanej wielkości wektorowej [1].

Zmniejszenie liczby zmiennych wynika z możliwości wykorzystania potencjałów wektorowych do opisu pola. Wykorzystywanie potencjałów w celu zmniejszenia liczby zmiennych jest w praktyce realizowane jedynie dla modeli 2D. Dla takich UWW rozważane są bowiem dwa podejścia do analizy pola

elektromagnetycznego, bazujące na wymuszeniu \mathbf{H} (natężenie pola magnetycznego) albo na wymuszeniu \mathbf{J} (gęstość prądu we wzbudniku). W pierwszym przypadku pole elektromagnetyczne posiada tylko jedną składową (istnieje jedna składowa wektora \mathbf{H}), a w drugim gęstość prądu wzbudzającego posiada tylko jedną składową przestrzenną (tak jak i magnetyczny potencjał wektorowy \mathbf{A}). W konsekwencji, przy stosowaniu pierwszego podejścia, możemy analizować prądy wirowe posiadające dwie składowe przestrzenne, a przy drugim podejściu analizować pole elektromagnetyczne o dwóch składowych. Posługiwanie się w drugim przypadku potencjałem wektorowym \mathbf{A} , zamiast natężeniem pola \mathbf{H} , pozwala na zmniejszenie liczby zmiennych modelu obliczeniowego, sprowadzając obliczenia do analizy jedynie jednej składowej potencjału wektorowego \mathbf{A} . W zagadnieniach nagrzewania indukcyjnego 2D, prowadzi to do niemal powszechnego wykorzystywania potencjału wektorowego \mathbf{A} do opisu analizowanego pola elektromagnetycznego. W takich przypadkach kierunek prądu wymuszającego pole magnetyczne (prądu we wzbudniku) musi być prostopadły do powierzchni rozważań. W analizowanym przypadku (rys. 1), nawet przy potraktowaniu układu jako nieskończenie długi wzdłuż wsadu, potencjał wektorowy \mathbf{A} posiada dwie składowe, natomiast jedną składową posiada wtedy wektor natężenia pola magnetycznego \mathbf{H} . Rozważane zagadnienie można więc od strony elektromagnetycznej potraktować jako 2D, ale przy wykorzystaniu w obliczeniach wektora \mathbf{H} z narzuconą wartością \mathbf{H}_0 na powierzchni wsadu. Od strony obliczeniowej stosunkowo proste jest przyjęcie stałej wartości \mathbf{H}_0 na całej powierzchni zewnętrznej rozważanego wsadu wklęsło-wypukłego. Nawet dla rozważanego przypadku wzbudnika cylindrycznego jest to niewątpliwie założenie, które należy traktować jako założenie upraszczające. W dalszej części pracy pokazany zostanie wywołany tym założeniem błąd obliczeniowy.

Jeśli w prowadzonej analizie jako wymuszenie potraktujemy prąd płynący w cylindrycznym wzbudniku, to zagadnienie wygodniej jest traktować jako 3D, co dodatkowo nie wymaga założenia upraszczającego o nieskończonej długości w trzecim wymiarze. W przypadku numerycznego rozwiązywania zagadnień elektromagnetycznych 3D wykorzystywane są w praktyce różne sposoby jego opisu matematycznego. Bazują one albo na podejściu z wykorzystaniem wektorowego potencjału magnetycznego \mathbf{A} definiowanego zależnością (1):

$$\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A} \quad (1)$$

gdzie: \mathbf{B} – indukcja pola magnetycznego, albo z wykorzystaniem elektrycznego potencjału wektorowego \mathbf{T} definiowanego zależnością (2):

$$\mathbf{J} = \text{rot } \mathbf{T} \quad (2)$$

gdzie: \mathbf{J} – gęstość powierzchniowa prądu.

Biorąc pod uwagę tożsamość wektorową $\text{rot grad } V \equiv 0$, potencjały wektorowe \mathbf{A} i \mathbf{T} są określone definicyjnie z dokładnością do gradientu potencjału skalarnego, co po wprowadzeniu do II równania Maxwella (3):

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3)$$

zależność (1), pozwala napisać dla natężenia pola elektrycznego \mathbf{E} :

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \text{grad } V \quad (4)$$

Powyższa tożsamość wektorowa pozwala również dla obszarów bez prądów wirowych i wzbudzenia ($\text{rot } \mathbf{H} = 0$) wprowadzić tzw. całkowity magnetyczny potencjał skalarny Ψ_{tot} definiowany jako:

$$\mathbf{H} = -\text{grad } \Psi_{tot} \quad (5)$$

W obszarach bez prądów wirowych, w których występuje jednak narzucony prąd wzbudzający o gęstości \mathbf{J}_n (prąd w „powietrzu”) wywołujący pole o natężeniu \mathbf{H}_0 , wygodnie jest (ze względów obliczeniowych) traktować pole magnetyczne \mathbf{H} jako sumę dwóch pól:

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 - \text{grad } \phi \quad (6)$$

Wprowadzony w taki sposób potencjał ϕ jest nazywany zredukowanym skalarnym potencjałem magnetycznym. Narzucone pole \mathbf{H}_0 może być wtedy obliczone z prawa Biota-Savarta i traktowane jako znane.

W obszarach, w których występują prądy wirowe wprowadzenie elektrycznego potencjału wektorowego \mathbf{T} do I równania Maxwella (7):

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (7)$$

prowadzi do zależności:

$$\mathbf{H} = \mathbf{T} - \text{grad } \Omega \quad (8)$$

W przypadku modeli trójwymiarowych UWW stosowany jest opis z wykorzystaniem magnetycznego, jak i elektrycznego potencjału wektorowego.

W nagrzewaniu indukcyjnym ciał stałych obliczenia cieplne można sprowadzić do rozwiązywania równania Fouriera-Kirchhoffa:

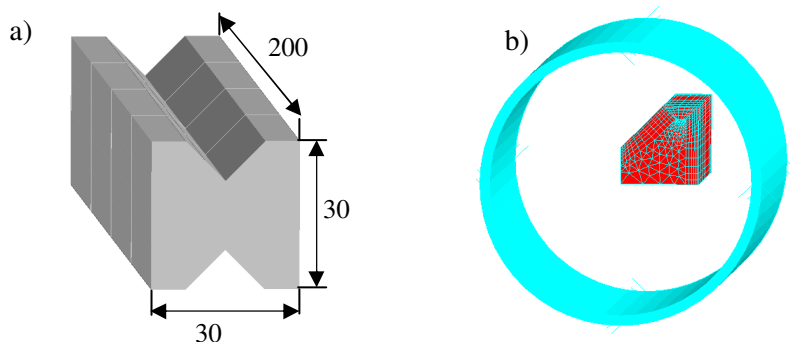
$$\text{div}[(-\lambda)\text{grad } \vartheta] + \rho c \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = p_v \quad (9)$$

gdzie: λ – przewodność cieplna właściwa, ρ – gęstość, c – ciepło właściwe, p_v – objętościowa gęstość strumienia cieplnego, z odpowiednio dobranymi warunkami brzegowymi, zwykle III rodzaju.

Ze względu na występującą, wyraźną zależność wartości parametrów materiałowych od temperatury, symulacja nagrzewania indukcyjnego powinna być realizowana jako obliczenia z wzajemnym sprzężeniem elektromagnetyczno-cieplnym.

OBLICZENIA SYMULACYJNE

Analizę wpływu częstotliwości na równomierność nagrzewania wsadów wklęsło-wypukłych przeprowadzono na przykładzie przedstawionego na rys. 2a fragmentu matrycy zaginarki. Ponieważ rozważania dotyczyły jedynie równomierności nagrzewania w przekroju poprzecznym, dlatego (dla uproszczenia dyskretnego modelu obliczeniowego) analizie obliczeniowej poddano jedynie fragment wsadu o długości $l = 200$ mm, kilkukrotnie większej od liniowych wymiarów przekroju poprzecznego. Przy wykorzystaniu istniejących w układzie symetrii, pozwoliło to na rozważenie modelu obliczeniowego wsad-cylindryczny wzbudnik, przedstawionego na rys. 2b.



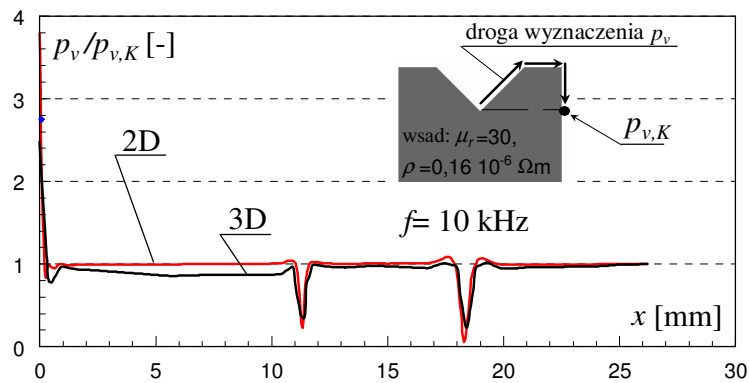
Rys. 2. Rozważany układ wzbudnik-wsad:

a) wymiary geometryczne wsadu, b) model obliczeniowy 3D

Przy rozważaniach dotyczących równomierności nagrzewania jedynie w przekroju poprzecznym wsadu pojawia się pytanie o konieczność stosowania trójwymiarowego 3D modelu obliczeniowego wsadu. Z tego też powodu jako pierwsze wykonano sprawdzające obliczenia porównawcze rozkładu gęstości objęściowej mocy wydzielonej we wsadzie przy stosowaniu numerycznego modelu 2D pola elektromagnetycznego z natężeniem pola magnetycznego H jako wielkością obliczeniową oraz modelu 3D opartego o skalarny zredukowany potencjał magnetyczny ϕ i elektryczny potencjał wektorowy T . Aby ułatwić porównanie, przyjęto liniowość magnetyczną stalowego wsadu przy wartości

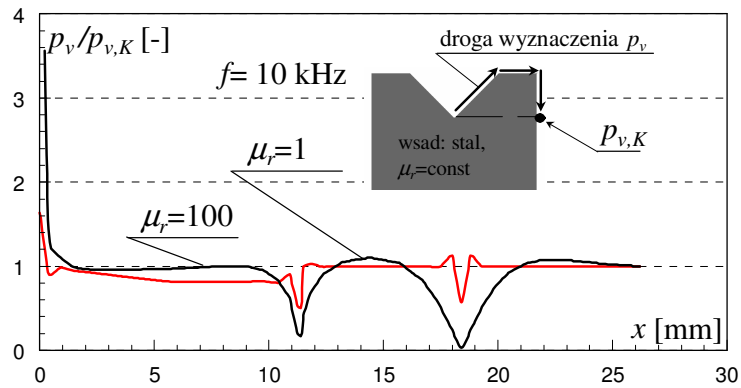
$\mu_r = 30$. Dla takiego przypadku na rys. 3 przedstawiono przykładowo porównanie rozkładu gęstości objętościowej mocy p_v na powierzchni wsadu odniesionej do wartości $p_{v,K}$ w punkcie K (ścieżka wyznaczenia p_v oraz położenie punktu K przedstawiono na rys. 3), przy częstotliwości prądu zasilającego $f = 10\text{kHz}$. Dla modelu 3D rozkład dotyczył przekroju poprzecznego wsadu w jego części środkowej (powierzchnia symetrii).

Przedstawione wykresy pokazują dużą zgodność, uzyskanych dla modelu 2D i 3D, względnych rozkładów gęstości objętościowej mocy. Widać jednak również, że w niektórych obszarach, szczególnie w części zagłębienia matrycy ($x = 0$), jak również naroży mamy jednak do czynienia z wyraźnymi różnicami uzyskanych wyników. Ponieważ prezentowana analiza skupia się głównie na zagadnieniach dotyczących nagrzewania w okolicach krawędzi wsadu, dlatego mimo względnie dużej zgodności wyników dla modelu 2D i 3D wydaje się niezbędne wykorzystanie w prowadzonych rozważaniach modelu 3D.



Rys. 3. Porównanie rozkładu względnej wartości gęstości objętościowej mocy na powierzchni wsadu, przy obliczeniach dla modelu 2D i 3D

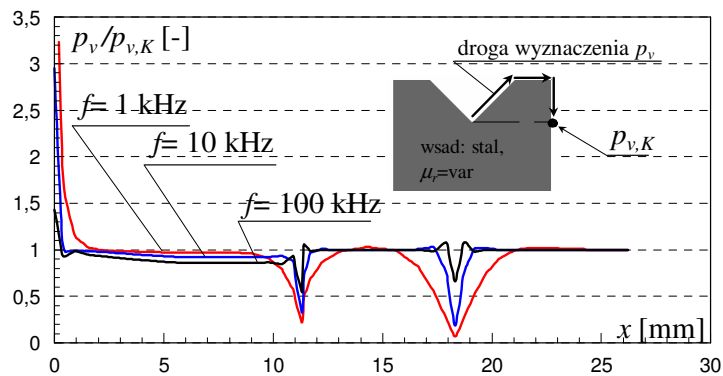
Posługując się przedstawionym na rys. 2b trójwymiarowym modelem obliczeniowym, z liniowym magnetycznie modelem wsadu stalowego, przeanalizowano wpływ wartości względnej przenikalności magnetycznej wsadu na badany rozkład gęstości objętościowej mocy. Wyniki przykładowych obliczeń, przy częstotliwości zasilania $f = 10\text{kHz}$, przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Porównanie rozkładów względnych wartości gęstości objętościowej mocy we wsadzie dla różnych wartości przenikalności magnetycznej

Przedstawione wyniki pokazują dużą zależność rozkładu gęstości objętościowej mocy od stanu magnetycznego wsadu, co ma duże znaczenie zarówno z punktu widzenia nieliniowych charakterystyk magnesowania, jak i nagrzewania wsadów stalowych powyżej punktu Curie przemiany magnetycznej.

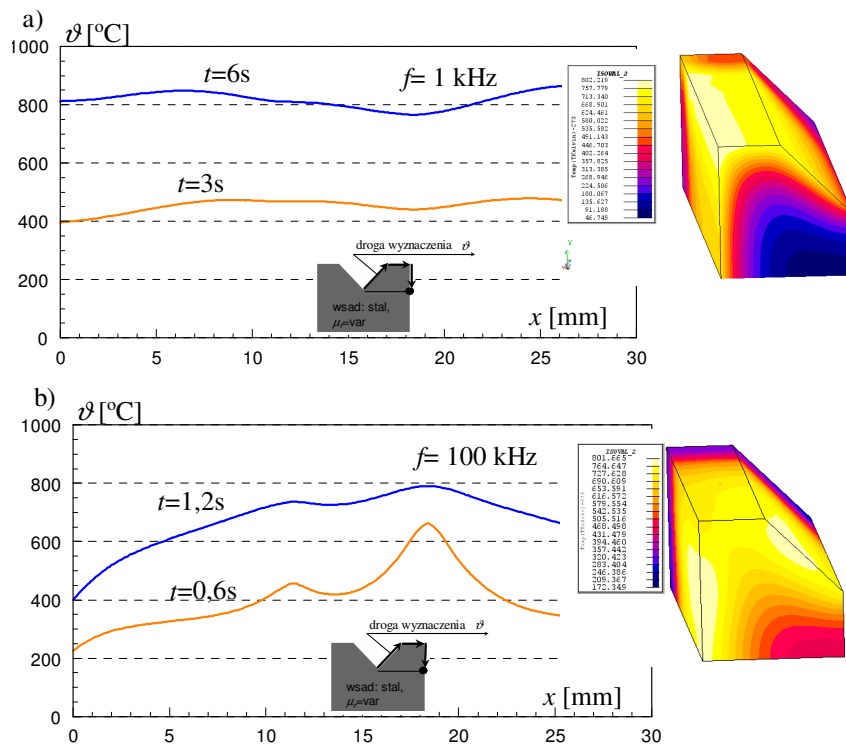
Przykładowe rozkłady $p_v/p_{v,K}$ dla nieliniowego modelu wsadu stalowego przy różnych częstotliwościach źródła zasilania (przy stałej wartości skutecznej prądu wzbudnika) przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Porównanie rozkładu gęstości objętościowej mocy na powierzchni wsadu przy różnych wartościach częstotliwości prądu zasilania

Przedstawiony wpływ, zarówno częstotliwości prądu zasilania, jak i przenikalności magnetycznej, na rozkład gęstości objętościowej mocy wydzielonej w warstwie przypowierzchniowej wsadu wzdłuż obwodu jego przekroju po-

przecznego, wskazuje na możliwość regulowania rozkładu temperatury wzdłuż tego obwodu. Uzyskiwany rozkład temperatury będzie wynikiem zarówno zastosowanej częstotliwości, jak i wartości prądu wzbudnika (przy czym wpływ wartości prądu wynika zarówno ze zmiany stopnia nasycenia magnetycznego wsadu, jak i ze zjawiska przewodzenia ciepła oraz warunków jego wymiany z otoczeniem). Na rys. 6 przedstawiono przykładowe rozkłady temperatury powierzchni wsadu wzdłuż fragmentu obwodu przekroju poprzecznego uzyskiwane przy częstotliwości zasilania 1 kHz i 100 kHz, przy stosowaniu 10-zwojnego wzbudnika cylindrycznego o średnicy $D = 52$ mm zasilanego prądem sinusoidalnym o wartości skutecznej odpowiednio $I = 3 \cdot 1170 = 3510$ A oraz $I = 1170$ A.



Rys. 6. Rozkłady temperatury powierzchni wsadu wzdłuż fragmentu obwodu przekroju poprzecznego wsadu: a) $f = 1$ kHz, b) $f = 100$ kHz

Na rys. 6 przedstawiono również przestrzenne rozkłady temperatury wsadu (dla chwil czasowych, w których maksymalna wartość temperatury sięga około 800°C). Zaprezentowane rozkłady temperatury pokazują, że okolice krawędzi części wypukłych ulegają przegrzaniu przy wysokich częstotliwościach, przy

czym jest ono tym większe, im ostrzejsza (mniejsza wartość kąta w przekroju poprzecznym) jest wypukłość. Analogicznie części te są niedogrzone przy niskich częstotliwościach. Graniczna wartość częstotliwości jest funkcją parametrów materiałowych wsadu, jak i jego wymiarów geometrycznych oraz szybkości nagrzewania. Wartość stosowanej częstotliwości skutkuje w oczywisty sposób zmianą głębokości wnikania fali elektromagnetycznej, a co za tym idzie wpływa na rozkład temperatury w głąb wsadu. Uzyskanie wymaganego względami technologicznymi rozkładu temperatury zarówno w głąb wsadu, jak i po obwodzie przekroju poprzecznego wymaga niekiedy nagrzewania z wykorzystaniem dwóch różnych częstotliwości zasilania stosowanych jedna po drugiej lub równocześnie.

LITERATURA

- [1] **Zgraja J.:** Symulacja i optymalizacja komputerowa w analizie indukcyjnego nagrzewania powierzchni płaskich, Zeszyt Naukowe PŁ, nr 996, 2007.

INFLUENCE OF THE FREQUENCY ON THE INTENSITY OF HEATING THE EDGES OF CONCAVE-CONVEX OF CHARGE IN CYLINDRICAL INDUCTOR

Summary

One way to adjust the surface temperature distribution of induction heating charge of complex shapes is to change the frequency of the power supply. This method allows a very high uniformity of heating of the surface of the convex-concave charges such as gear wheels. In this paper, using the 3D simulation the electromagnetic and temperature fields were analyzed induction heating of the matrix to flanging.

Keywords: induction heating, optimisation.