ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Seria: HUTNICTWO z.43

Nr kol.1156

Czesław SAJDAK, Jerzy BARGLIK, Romuald KADZIMIERZ Katedra Podstaw Procesów Metalurgicznych Wydział Metalurgii i Inżynierii Materiałowej Politechnika Ślaska

MOC CZYNNA WYDZIELANA WE WSADACH PŁASKICH NAGRZEWANYCH INDUKCYJNII W BIEGNĄCYM POLU MAGNETYCZNYM

Streszczenie. W pracy wyznaczono związki umożliwiające obliczanie mocy czynnej we wsadzie płaskim nagrzewanym w biegnącym polu magnetycznym. Rozpatrywano układ grzejny z dwustronnym wzbudnikiem pola biegnącego. Przedstawiono charakterystyki uniwersalne ułatwiające obliczenia.

Summary. The paper presents the relations enabling the calculation of active power in flat charge heated in a travelling magnetic field. The heating system of two-sided travelling field inductor has also been analysed. The universal characteristics making the calculations easier have also been presented.

Резюме. В работе обозначены зависимости способствующие расчетам активной мощности в плоской шихте нагреваемой в бегущем магнитном поле. Рассмотрена нагревательная система с двухстронным индуктором бегущего поля. Представлены универсальные характеристики способствующие расчетам.

1. WSTEP

Do nagrzewania indukcyjnego cienkich płyt i blach metalowych (o grubościach mniejszych od głębokości wnikania pola elektromagnetycznego) stosuje się wzbudniki płaskie wytwarzające pole poprzeczne [1-3]. Przy dużych wydajnościach wzbudniki wykonuje się jako dwustronne i wielobiegunowe. Nagrzewanie odbywa się zwykle w przesuwie. Cienkie wsady mogą być nagrzewane również we wzbudnikach wytwarzających biegnące pole elektromagnetyczne – dwustronnych (rys, la) lub jednostronnych (rys. lb)



Rys.1. Nagrzewnice indukcyjne z wzbudnikami pola biegnącego a – wzbudnik dwustronny, b – wzbudnik jednostronny 1 – uzwojenie, 2 – rdzeń magnetyczny wzbudnika, 3 – wsad, 4 – dodatkowy rdzeń magnetyczny

Fig.1. Induction heaters with the travelling field inductors

a - two-sided inductor, b - one-sided inductor 1 - winding, 2 - magnetic core of the inductor, 3 - charge, 4 - ad-

ditional magnetic core

Układy wzbudnik – wsad z rys.1 przypominają swą konstrukcją płaskie silniki liniowe [4,5] oraz pompy i rynny indukcyjne do transportu ciekłych metali [6,7]. Przy projektowaniu nagrzewnic z wzbudnikami pola biegnącego można więc wykorzystać, po niezbędnych modyfikacjach, metody stosowane przy obliczeniach parametrów tych maszyn. Podstawowe znaczenie ma obliczanie mocy czynnej wydzielanej we wsadzie. W pracy wyznaczono zależności i charakterystyki umożliwiające określenie tej wielkości dla nagrzewnicy ze wzbudnikiem dwustronnym (rys. la).

W celu uproszczenia analizy zagadnienia przyjęto, że:

- a) wzbudnik i nagrzewany wsad są nieskończenie rozległe w kierunkach osi x i y (rys. 1a),
- b) przez uzwojenia wzbudnika, o jednakowych podziałkach biegunowych τ, płyną w kierunku osi y prądy o częstotliwości f, wytwarzające sinusoidalną falę pola biegnącego,
- c) przenikalność magnetyczna $\underset{o}{\mu}$ i konduktywność
 σ materiału wsadu są stałe,

d) wsad jest nieruchomy.

Założenia powyższe są powszechnie stosowane w przybliżonej analizie pola elektromagnetycznego w nagrzewnicach indukcyjnych, silnikach liniowych i pompach indukcyjnych [1,2,5,6-9]. Uzasadniają je zwłaszcza znaczne wymiary wzbudników (długości: 1 - 2 m, szerokości: ponad 1 m) oraz małe predkości przesuwu wsadu (wielokrotnie mniejsze od predkości synchronicznej pola biegnącego - poślizg s = 0.9 - 0.95). Rzeczywisty układ wzbudnik - wsad sprowadza się wówczas do prostego modelu, w którym przestrzeń między wzbudnikami wypełniona jest izotropową, nieruchomą i nieskończenie rozległą w kierunkach osi x i y płytą metalową (rys.2).

Gęstości liniowe prądów wzbudników na powierzchniach (z = $\stackrel{+}{-}$ g) rdzeni magnetycznych wzbudników o przenikalnościach magnetycznych $\mu_{Fe} \rightarrow \infty$, wynoszą [8]:

$$J_{1y} = \mathcal{R}e \left(J_{-1y}\right) = \mathcal{R}e\{J_{1m} \exp[j(\omega t - \alpha x)]\}$$
(1)

gdzie:

j - jednostka urojona, $\omega = 2\pi f$,

t - czas,

$$\alpha = \frac{\pi}{\tau} , \qquad (2)$$

τ - podziałka biegunowa.

Moc czynna wydzielana w środowisku przewodzącym wynosi

$$P = \frac{1}{2} \sigma \int_{V} E_{m}^{2} dV$$
(3)

gdzie:

E – wartość maksymalna natężenia pola elektrycznego, w – objętość środowiska.

W rozważanym przypadku, dla wzbudnika o długości l = $2p\tau$ (wymiar w kierunku osi x) i szerokości b (wymiar w kierunku osi y) wyrażenie (3) przyjmuje postać

$$P = \frac{1}{2} 2p\tau b\sigma \int_{-g}^{g} \frac{E_{my-my}}{e^{-g}} dz$$
(4)



Rys.2. Płyta przewodząca w biegnącym polu magnetycznym [8] Fig.2. Conductive plate in a travelling magnetic field [8]

gdzie:

p - líczba par biegunów wzbudnika,

E – składowa natężenia pola elektrycznego we wsadzie (postać zespolona),

E - wartość sprzężona natężenia pola elektrycznego E

Jak wynika z zależności (4) do obliczenia mocy czynnej wystarcza znajomość funkcji określającej natężenie pola elektrycznego we wsadzie.

2. PŁYTA METALOWA W BIEGNĄCYM POLU MAGNETYCZNYM

Przypadek oddziaływania biegnącego pola magnetycznego na płytę przewodzącą rozpatrywany jest m. in. w pracy [8]. Przeprowadzona tam analiza pola elektromagnetycznego ma na celu wyznaczenie parametrów elektrycznego schematu zastępczego oraz sił elektrodynamicznych w pompach indukcyjnych do transportu ciekłych metali.

W [8] wykazano, że przy założeniach jak w p.1 tej pracy, natężenie pola elektrycznego wynosi

$$\frac{E}{my} = -\frac{j\omega\mu}{2\beta} \frac{J}{\sinh(\beta g)} e^{j(\omega t - \alpha x)}$$
(5)

gdzie:

$$\beta = \sqrt{\alpha^2 + j\omega\mu\sigma}$$
(6)

3. MOC CZYNNA WYDZIELANA W PŁYCIE

Po wprowadzeniu zależności (5) do wzoru (4) otrzymuje się po przekształceniach

$$P = \frac{1}{g} lb\sigma \omega^2 \mu^2 J^2_{o lm} \frac{1}{(\mathcal{R}e\beta)^2 + (\mathcal{G}m\beta)^2} \frac{\frac{1}{\mathcal{R}e\beta} \sinh(2g\mathcal{R}e\beta) + \frac{1}{\mathcal{G}m\beta} \sin(2g\mathcal{G}m\beta)}{\cosh(2g\mathcal{R}e\beta) - \cos(2g\mathcal{G}m\beta)}$$

$$\mathcal{R}e\beta = \sqrt{\frac{\alpha^2 + \sqrt{\alpha^2 + (\omega\mu\sigma)^2}}{2}}$$
(8)

$$\Im m\beta = \sqrt{\frac{-\alpha^2 + \sqrt{\alpha^2 + (\omega\mu_o\sigma)^2}}{2}}$$
(9)

Jeżeli do powyższych związków wprowadzi się parametr bezwymiarowy

$$\omega_{\rm r} = \omega \mu_{\rm o} \sigma g^2 = 2(\frac{g}{\delta})^2 \tag{10}$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu_{o}\sigma}}, \qquad (11)$$

gdzie: wówczas

 $P = \frac{1}{8} lbg^3 \sigma \omega^2 \mu_o^2 J_{lm}^2 F_o(\beta)$ (12)

$$F_{o}(\beta) = \frac{1}{\beta_{R}^{2} + \beta_{I}^{2}} \frac{\frac{1}{\beta_{R}} \sinh(2\beta_{R}) + \frac{1}{\beta_{I}} \sin(2\beta_{I})}{\cosh(2\beta_{R}) - \cos(2\beta_{I})}$$
(13)

$$\beta_{\rm R} = \sqrt{\frac{\alpha_{\rm r}^2 + \sqrt{\alpha_{\rm r}^4 + \omega_{\rm r}^2}}{2}}$$
(14)

$$\beta_{1} = \sqrt{\frac{-\alpha_{r}^{2} + \sqrt{\alpha_{r}^{4} + \omega_{r}^{2}}}{2}}$$
(15)

$$\alpha_{\rm r} = \pi \frac{g}{\tau} = \alpha g \tag{16}$$

Wyrażenie (12) można przekształcić dalej do postaci:

$$P = \frac{ib}{8g\sigma} J_{im}^2 F(\beta)$$
(17)

$$F(\beta) = \omega_r^2 F_o(\beta).$$
(18)

Współczynniki $F_{0}(\beta)$ i $F(\beta)$ są bezwymiarowe, zależą tylko od parametrów ω_{r} i α_{r} (rys. 3 - 6). Ich postaci i sens fizyczny są podobne do współczynników kształtu dla wsadu płaskiego nagrzewanego w podłużnym polu elektromagnetycznym [9].



Rys.3. Zależność $F(\beta) = f(\omega_r) dla \alpha_r = 0 - 1$ Fig.3. Dependence $F(\beta) = f(\omega_r) dla \alpha_r = 0 - 1$

gdzie:



Rys.4. Zależność $F_{0}(\beta) = f(\omega) dla \alpha = 0 - 1$ Fig.4. Dependence $F_{0}(\beta) = f(\omega) dla \alpha = 0 - 1$



Rys.5. Zależność $F_0(\beta) = f(\alpha)$ dla $\omega = 0.1 - 1$ (a) i $\omega = 1 - 4$ (b) Fig.5. Dependence $F_0(\beta) = f(\alpha)$ for $\omega = 0.1 - 1$ (a) and $\omega = 1 - 4$ (b)





Rys.6. Zależność $F(\beta) = f(\alpha)$ dla $\omega = 0.1 - 1$ (a) i $\omega = 1 - 4$ (b) Fig.6. Dependence $F(\beta) = f(\alpha)$ for $\omega = 0.1 - 1$ (a) and $\omega = 1 - 4$ (b)

115

4. PODSUMOWANIE

W pracy podano zależności umożliwiające wyznaczanie mocy czynnej wydzielanej we wsadach płaskich nagrzewanych we wzbudniku dwustronnym, podstawowej wielkości niezbędnej do zaprojektowania układu grzejnego wzbudnik-wsad. Przy obliczaniu parametrów elektrycznego schematu zastępczego oraz pozostałych wielkości elektrycznych rozważanego typu nagrzewnicy można wykorzystać zależności stosowane przy projektowaniu płaskich silników liniowych i pomp indukcyjnych [4 - 6,8].

Praktyczne obliczenia mogą ułatwić wyznaczone charakterystyki uniwersalne, ujmujące zależność współczynników F_0 i F od parametrów ω_r i α_r , a więc od stosunków grubości wsadu i głębokości wnikania pola elektromagnetycznego (11)

$$\frac{g}{\delta} = \sqrt{\frac{\omega}{2}}$$
(19)

oraz grubości wsadu i podziałki biegunowej wzbudnika (16)

$$\frac{g}{\tau} = -\frac{\alpha}{\pi} r .$$
(20)

LITERATURA

- [1] Liwiński W.: Nagrzewnice indukcyjne skrośne. WNT, Warszawa 1968.
- [2] Sajdak Cz., Samek E.: Nagrzewanie indukcyjne. Podstawy teoretyczne i zastosowanie. Wyd. Śląsk, Katowice 1987.
- [3] Jackson W.B.: Transverse flux induction heating of flat metal products. VIIth International Congress on Electroheat. Warszawa 1972, ref. N206.
- [4] Pawluk K., Szczepański W.: Silniki elektryczne liniowe. WNT, Warszawa 1974.
- [5] Turowski J.: Obliczenia elektromagnetyczne elementów maszyn i urządzeń elektrycznych. WNT, Warszawa 1982.
- [6] Woldek A.I.: Indukcyonnyje MGD maszyny s żydkomietaliczeskim raboczim tiełom. Energija, Leningrad 1970.
- [7] Werte L.A.: Magnitnaja gidrodinamika w mietałłurgii. Mietałłurgija, Moskwa 1975.

[8] Baranow G.A. i inni: Rascziot i projektirowanije indukcyonnych MGD maszyn s żydkomietałliczeskim raboczim tiełom. Atomizdat, Moskwa 1978.
[9] Langer E.: Teorie indukcniho a djelektrickeho tepla. CSAV, Praha 1964.

ACTIVE POWER EMITTED FROM FLAT CHARGES HEATED INDUCTIVELY IN THE TRAVELLING MAGNETIC FIELD

Abstract

Flat inductors producing transverse flux magnetic field are used for induction heating of thin metal strips and sheets (their thickness smaller than the depth of electromagnetic field penetration). Thin charges can be also heated in the inductors producing the travelling magnetic field. They can be two-side (fig.1) or one-side (fig.1b) inductors. The methods used for parameters calculations of the linear induction motors [4,5] and the electromagnetic pumps [6,7], after necessary modifications, could be applied. For simplification of the calculations the following assumptions have been taken:

-the inductor and the heated charge are infinitely long in the direction of X and Y axes (fig.la),

-the inductor produces only sine wave of the travelling field,

- magnetic permeability and electric conductivity are constant,

-the charge is stationary.

Then the active power induced in the charge is determined by formulae (3,4), where $\underset{my}{E}$ is the electric field intensity in the charge. The electric field intensity E (formula 5) is determined for example in [8]. After substitution of formula (5) to formula (4) the dependence (7) enabling the calculation of the active power for different charge thickness g, pole pitch τ , frequency f, current density j, electric conductivity σ , length 1 and width b of the inductor is received.

For formulae (7-9) the dimensionless parameter ω (formula 10) is introduced. Then the active power in the charge is the function of dimensionless coefficient F (formula 13) or F (formula 18). The relationship between coefficient F and F and parameters ω (formula 10) and α (formula 16) is presented in fig.(3-6). These characteristics simplify the active power P calculations. On the basis of formulae (19-20) dimensionless parameters ω and α depend only on the charge thickness g, the depth of electromagnetic field penetration δ and the pole pitch τ . The relationships which are discussed in the paper (formulae 12,17) and characteristics (fig.3-6) can find a practical application for designing the induction heaters with inductors producing travelling magnetic field. Other induction heaters parameters are calculated in a similar way as the method described in the papers [1,2].