

Marcin WESOŁOWSKI*
Przemysław SKRZYPCZAK**
Jacek HAUSER**

PARAMETRY CIEPLNE WPLYWAJĄCE NA DOKŁADNOŚĆ MODELOWANIA PROCESU NAGRZEWANIA INDUKCYJNEGO

Obliczenia indukcyjnych układów grzejnych wymagają, w każdym przypadku, sprzężonych obliczeń pól elektromagnetycznych i cieplnych. W zagadnieniach praktycznych wykorzystywanych jest wiele modeli i procedur umożliwiających projektowanie procesów oraz urządzeń wykorzystujących nagrzewanie indukcyjne. Z uwagi na możliwość doświadczalnej weryfikacji wykonywanych analiz, problematyka ta jest szeroko opisywana oraz rozwijana. Tym niemniej, w wielu przypadkach, przyjmowanie uproszczeń w zakresie stosowanych modeli matematycznych, numerycznych oraz parametrów materiałowych, prowadzi do nadmiernego wzrostu błędów modelowania urządzeń tej klasy. W niniejszej pracy skupiono się na prezentacji najbardziej istotnych źródeł błędów modeli cieplnych, mogących występować podczas numerycznego modelowania układów wzbudnik – wsad, przeznaczonych do skrótnego nagrzewania indukcyjnego. Na podstawie wielowariantowych obliczeń określono dopuszczalny zakres analizowanych uproszczeń, gwarantujący wysoką dokładność modelowania indukcyjnych układów grzejnych.

KEYWORDS: nagrzewanie indukcyjne, modelowanie numeryczne, dokładność

1. WPROWADZENIE

Nagrzewanie indukcyjne jest szeroko wykorzystywaną i ciągle rozwijaną metodą elektrotermiczną. Opis matematyczny metody jest znany oraz dość dobrze poparty zbieżnością z doświadczeniami fizycznymi. Projektowanie urządzeń do nagrzewania indukcyjnego jest, w dzisiejszych czasach, najczęściej realizowane przy wykorzystaniu modelowania numerycznego. Wielu Autorów [1, 2] skupia się na wykonywaniu zaawansowanych obliczeń oraz modeli, których sprawdzalność jest ograniczona i zazwyczaj nie umożliwia otrzymywania wyników o wiarygodności przewyższającej klasyczne metody i procedury. Przykładem tego typu analiz jest obliczanie konwekcyjnej wymiany ciepła przy wykorzystaniu równań mechaniki płynów. Pomimo niewątpliwej efektywności

*Politechnika Warszawska.

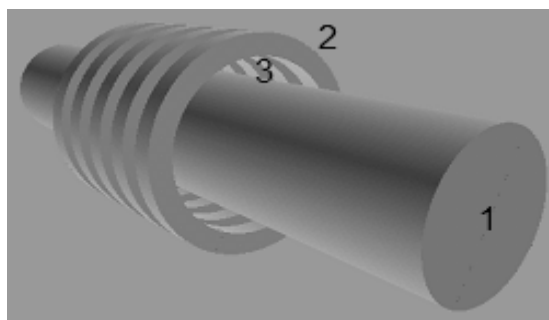
**Politechnika Poznańska.

prezentowanych wyników, ich dokładność jest ograniczona. W większości przypadków projektowania układów do nagrzewania indukcyjnego nie ma konieczności stosowania tego rodzaju analiz.

W niniejszej pracy omówiono modele wykorzystywane w zakresie analiz problematyki wymiany ciepła w układzie wzbudnik – wsad, charakterystycznym dla nagrzewania objętościowego. Stosowanie pełnych modeli często prowadzi do nadmiernego wzrostu czasu obliczeń, bez znaczącego zwiększenia dokładności. Zaproponowano wykorzystanie uproszczonych modeli zjawiska przewodzenia, konwekcji i radiacji. Wyniki uzyskane przy wykorzystaniu obliczeń uproszczonych porównano z modelami pełnymi. Dzięki wyznaczeniu błędów, określono granice stosowalności proponowanych uproszczeń.

2. MODEL

Tematyka prezentowana w niniejszym artykule dotyczy efektywnego i dokładnego modelowania zjawisk cieplnych, bez analizy wpływu modelowania pola elektromagnetycznego. Skupiono się na prezentacji układów umożliwiających realizację nagrzewania indukcyjnego skośnego (objętościowego) z polem poprzecznym. Poza szczególnymi przypadkami, konstrukcja większości układów wzbudnik – wsad tej kategorii urządzeń jest podobna. Do realizacji wszystkich obliczeń wykorzystano model pokazany na rysunku 1, o geometrii typowej dla omawianej grupy urządzeń. Wsad o geometrii cylindrycznej, wykonany z stali niemagnetycznej, umieszczony jest w miedzianym wzbudniku umieszczonym w części centralnej i zajmującym 1/3 wysokości. Wsad (1) miał wysokość $h = 300$ mm i średnicę 30 mm. Model wzbudnika (2) wykonano z $n = 5$ zwojów miedzianego kształtownika o przekroju kwadratowym i długości boku $a = 10$ mm. W zależności od analizowanego przypadku, odstęp między wzbudnikiem i wsadem ulegał zmianom. Jako podstawowy przypadek, do którego odnoszono pozostałe analizy, wykorzystano model z szczeliną powietrzną (3) o grubości $\delta = 10$ mm. Podstawowe parametry materiałowe zaprezentowano w tabeli 1.



Rys. 1. Geometria modelu wzbudnik – wsad

Tabela 1. Podstawowe parametry materiałowe modelu

| | $\mu_w, (-)$ | $\rho, \Omega \cdot m$ | $\lambda, W/(m \cdot K)$ | $c_w, J/(kgK)$ | $\gamma, kg/(m^3)$ |
|----------|--------------|------------------------|--------------------------|----------------|--------------------|
| Wsad | 1 | $3,8 \cdot 10^{-7}$ | 12 | 654 | 7800 |
| Wzbudnik | 1 | $1,78 \cdot 10^{-8}$ | 200 | 380 | 8933 |

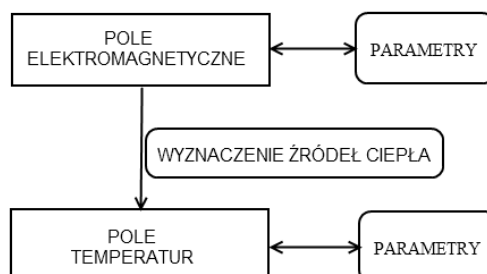
Wszystkie analizy wykonano w oparciu o powszechnie wykorzystywany model zagadnień elektromagnetycznych bazujący na rozwiązaniu równań Helmholtza (1). Uproszczenia prezentowanej zależności, polegające na obliczeniach harmonicznym oraz założeniu środowiska jednorodnego i izotropowego, nie stanowiły celu niniejszej pracy [3]. Ich wpływ na dokładność modelowania nagrzewnic indukcyjnych nie został omówiony w niniejszym artykule.

$$\nabla^2 H(W_p, \tau) - j\omega\mu\gamma H(W_p, \tau) = 0 \quad (1)$$

gdzie: W_p – współrzędna przestrzenna; T – temperatura; τ – czas.

Podczas obliczeń zastosowano wymuszenie prądowe. We wszystkich zwojach wzbudnika przyjęto prąd o wartości 500 A i częstotliwości 10 kHz. Uzyskane parametry pozwoliły na osiągnięcie głębokości wnikania 3 mm.

Z uwagi na analizę zagadnień cieplnych, obliczenia sprzężone wykonywano jednokrotnie, stosując najprostszy algorytm analizy sekwencyjnej, pokazany schematycznie na rysunku 2.



Rys. 2. Przepływ danych w typowej analizie sekwencyjnej

Obliczenia cieplne wykonywano w oparciu o równanie Fouriera – Kirchhoffa dla niestacjonarnego pola temperatury (2) [3]:

$$c(t)\rho(t)\frac{\partial t}{\partial \tau} - \text{div}(\lambda(t)\text{grad}t) + c(t)\rho(t)\bar{V}\text{grad}t = p_V \quad (2)$$

We wszystkich prezentowanych obliczeniach zastosowano stałe parametry materiałowe. Fakt ten nie ogranicza jednak poprawności prezentowanych wyników oraz samej pracy, ponieważ skupiono się na rodzaju stosowanych modeli zagadnienia cieplnego, bez analiz dotyczących nieliniowości parametrów materiałowych oraz sposobu sprzęgania obliczeń elektromagnetycznych i cieplnych.

Nieliniowość modeli wynikała jedynie z warunków brzegowych. W zależności od rodzaju analiz modyfikowano sposób ich wprowadzania oraz obliczania. Zagadnienia te omówiono w kolejnych rozdziałach niniejszego artykułu.

3. HIPERBOLICZNE RÓWNANIE PRZEWODZENIA CIAPŁA

Typowe obliczenia procesu nagrzewania indukcyjnego [1, 3] opierają się jedynie na analizie równania typu (2) zakładającego nieskończoną prędkość propagacji zaburzenia cieplnego. W niektórych aplikacjach elektrotermicznych wykorzystujących ultraszybkie procesy grzejne, stosowanie tej zależności prowadzi do znacznych błędów. W zagadnieniach tych wykorzystywane jest równanie Verotte'a (3):

$$c_p \left[\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} + \tau_q \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial \tau^2} \right] = \lambda \nabla^2 T(x, \tau) + p_V(x, \tau) + \tau_q \frac{\partial p_V(x, \tau)}{\partial \tau} \quad (3)$$

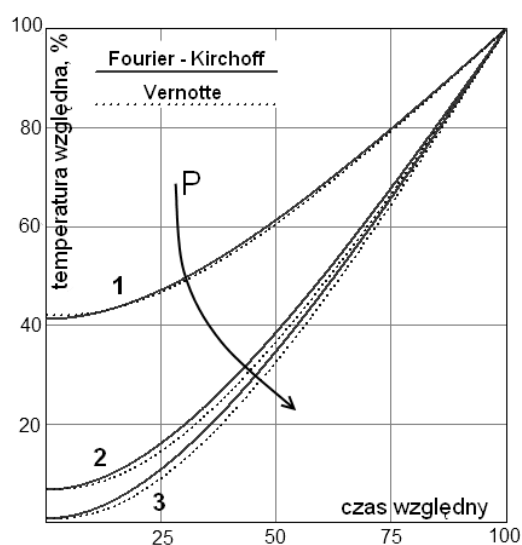
gdzie: p_V – objętościowa gęstość źródeł ciepła; c_p – ciepło właściwe; τ – czas.

Obliczenia dotyczące porównania wyników nagrzewania, uzyskanych przy wykorzystaniu modeli opartych na zależnościach (2) oraz (3) wykonano z użyciem autorskich procedur bazujących na metodzie różnic skończonych. Korzystanie z komercyjnych systemów MES [4, 5] nie było możliwe z uwagi na brak implementacji równania Vernotte'a. Wykorzystując model opisany w poprzednim rozdziale zmieniano moce grzejne wydzielane we wsadzie w granicach 1000 – 100 000 W, co skutkowało osiągnięciem temperatur granicznych w czasie od 0.01 do 1 s. Na rysunku 3 pokazano charakterystyki nagrzewania w skali temperatur względnych (odniesionych do maksymalnej dla każdego przypadku), przy mocach 1000, 10 000 i 100 000 W.

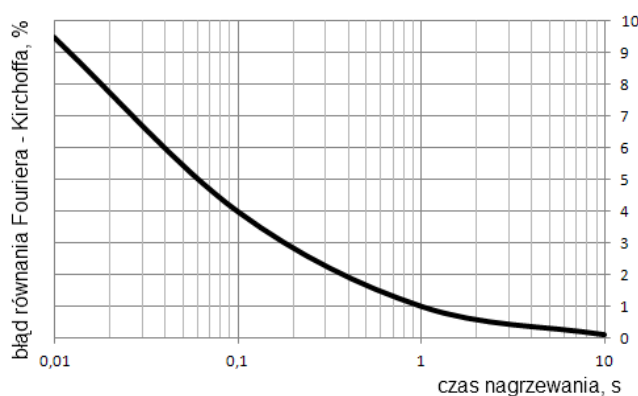
Na podstawie osiągniętych rezultatów wykazano, iż charakter odchyłek wynikający z różnic w stosowanych algorytmach analizy przewodzenia ciepła jest niemal identyczny dla wszystkich analizowanych wartości mocy. Maksymalne różnice pomiędzy wynikami występują w czasie wynoszącym 25% analizowanego zakresu. Różnice te, mimo podobnych wartości względnych, znacznie odbiegają w odniesieniu do wartości bezwzględnych. Wraz ze zwiększaniem mocy grzejnej, obserwowane różnice wyników osiągały znaczne wartości. Charakterystykę tą pokazano w skali półlogarytmicznej na rysunku 4.

Przy czasach nagrzewania na poziomie dziesiątków sekund, różnice pomiędzy charakterystykami nagrzewania uzyskiwanymi przy wykorzystaniu zależności (2) oraz (3) przekraczały 10 K. Maksymalne różnice pomiędzy uzyskiwanymi rezultatami uzyskano dla najkrótszych czasów nagrzewania na poziomie 0,01 s. W technologiach, w których występują krótkie czasy nagrzewania, wsady charakteryzują się zazwyczaj niewielkimi wymiarami. W tego typu układach stosowanie bliskiego rzeczywistości modelu propagacji ciepła jest konieczno-

ścią. Dynamika procesów wymaga bowiem ogromnej precyzji w dawkowaniu mocy dostarczanej do układów grzejnych. Wymóg ten jest bowiem kluczowy z punktu widzenia realizacji wielu procesów. Nawet relatywnie znikome błędy mogą być przyczyną niepowodzenia realizacji technologii zaawansowanych, jak wytwarzanie półprzewodnikowych materiałów lub szeroko rozumiany przemysł elektroniczny i nanotechnologiczny [2]. W pozostałych indukcyjnych systemach grzejnych, zwłaszcza o działaniu ciągłym, stosowanie równania Vernotte'a nie jest wymagane.



Rys. 3. Przebiegi względnych temperatur w czasie nagrzewania dla różnych wartości mocy, otrzymane dla dwóch równań przewodzenia ciepła. Strzałka wskazuje kierunek wzrostu mocy grzejnej



Rys. 4. Błąd wprowadzany przez stosowanie równania Fouriera – Kirchhoffa w funkcji czasu nagrzewania

4. KONWEKCYJNA WYMIANA CIEPŁA

Modelowanie wymiany ciepła w warunkach konwekcji jest zagadnieniem czasochłonnym, wymagającym sprzężonych obliczeń z zakresu mechaniki płynów i termodynamiki. Podstawowy model konwekcyjnej wymiany ciepła tworzony jest przez prawa zachowania masy, momentu oraz energii [3]. Równanie opisujące bilans energii (4) obejmujące wszystkie czynniki występujące w płynach i obowiązuje dla płynów ściśliwych:

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho c_p T_p) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x c_p T_p) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y c_p T_p) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z c_p T_p) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T_p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T_p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T_p}{\partial z} \right) + W_v + E_k + q_v + W_Q + \frac{\partial P}{\partial \tau} \quad (4)$$

gdzie: λ – przewodność cieplna właściwa, W_v – praca na pokonanie sił lepkości, E_k – energia kinetyczna, W_Q – energia cieplna powstająca na skutek sił lepkości, q_v – objętościowa gęstość energii źródeł ciepła, T_p – temperatura płynu w bezruchu.

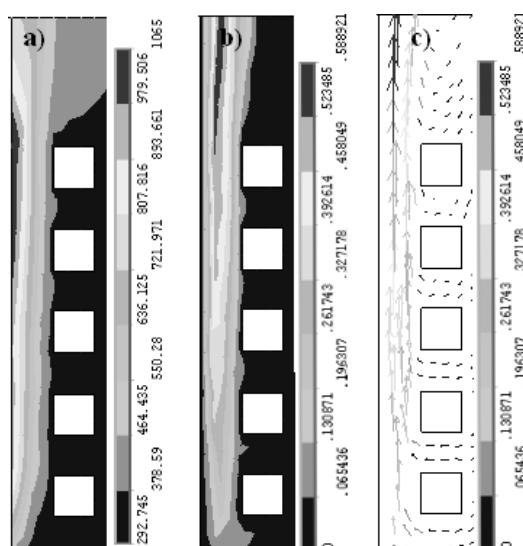
Lewa strona równania (4) obejmuje energię akumulowaną oraz dopływającą do rozpatrywanego obszaru na skutek przepływu masy. Prawa strona równania uwzględnia przewodzenie ciepła, moc wynikająca z sił lepkości (w_v), energii kinetycznej cząstek płynu (E_k), wewnętrznych źródeł ciepła (p_v), generacji ciepła w wyniku działania sił lepkości (Φ) oraz zmian ciśnienia.

Istotne komplikacje w rozwiązywaniu zagadnień tej klasy wynikają z konieczności uwzględniania równań bilansu pędu (Naviera–Stokesa) oraz zaawansowanych modelach przepływów turbulentnych, często występujących w urządzeniach elektrotermicznych. Pomimo dostępności dedykowanego oprogramowania [4, 5], analizy przepływu płynów w warunkach konwekcji należą do rzadkości przy projektowaniu nagrzewnic indukcyjnych. Z uwagi na czasochłonność oraz brak możliwości dokładnego sprawdzenia wyników analiz, obliczenia te wykonywane są głównie w celach naukowych. Na rysunku 5 pokazano przykładowe wyniki analiz konwekcyjnej wymiany ciepła w analizowanym modelu układu wzbudnik – wsad.

Uproszczone modelowanie konwekcyjnej wymiany ciepła polega na wykorzystaniu zasad analizy kryterialnej. W nagrzewnicach indukcyjnych do realizacji procesów nagrzewania objętościowego zazwyczaj nie wykorzystuje się wymuszonego przepływu płynu. Do realizacji obliczeń charakterystycznych dla konwekcji swobodnej, podstawowym kryterium umożliwiającym ocenę charakteru przepływu jest iloczyn liczb Grashoffa i Prandtla [3] (5). Na podstawie znajomości wartości tego iloczynu oraz parametrów geometrycznych i rodzaju układu, możliwy jest dobór odpowiedniego równania kryterialnego:

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g \cdot \delta^3 \cdot \beta \cdot \Delta t}{a \cdot \nu} \quad (5)$$

gdzie: a – dyfuzyjność cieplna, β – współczynnik rozszerzalności objętościowej płynu, ν – kinematyczny współczynnik lepkości.



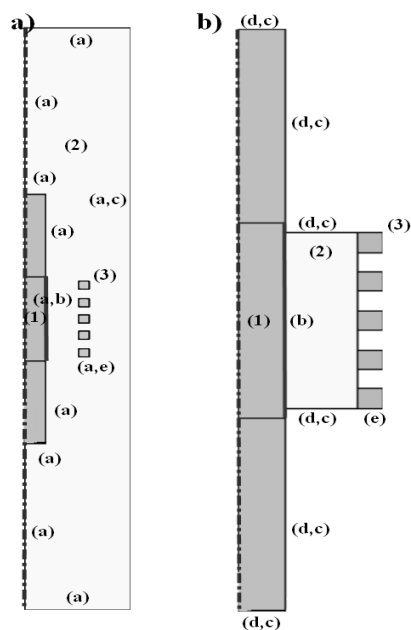
Rys. 5. Przykładowe pole temperatury (a) oraz pole prędkości płynu (b, c) w okolicy szczeliny powietrznej pomiędzy wzbudnikiem a wsadem nagrzewanym indukcyjnie

W układach do nagrzewania indukcyjnego, z uwagi na niewielką grubość szczeliny powietrznej, prędkości płynu są zazwyczaj niewielkie. Regułę tę potwierdzono obliczeniami zaprezentowanymi na rysunku 5. W celu uproszczenia analiz konwekcyjnego przepływu ciepła proponuje się wykorzystanie definicji zastępczej przewodności cieplnej właściwej (6) oraz wykonywanie analiz z wykorzystaniem modelu przewodzenia ciepła (2) [3]:

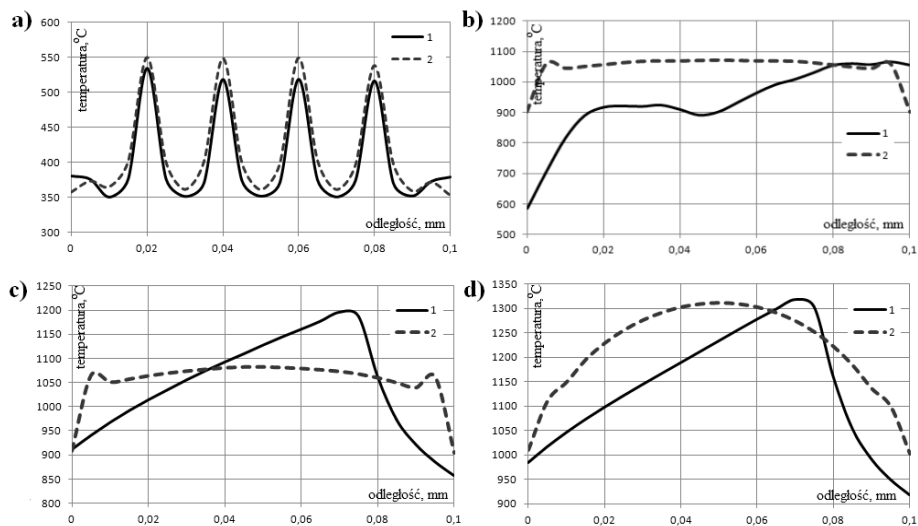
$$\lambda_z = \lambda_g C (Gr \cdot Pr)^n \quad (6)$$

Możliwości wykorzystania proponowanego modelu badano poprzez porównanie wyników obliczeń uwzględniających przepływy oraz modelu uproszczonego. Widok badanych modeli pokazano na rysunku 6.

Wykonywano obliczenia w stanie quasi–ustalonym, przy uwzględnieniu jedynie konwekcyjnego przejmowania ciepła. Tego rodzaju modele umożliwiły maksymalizację różnic między wynikami, dzięki nieuwzględnianiu zjawiska radiacyjnej wymiany ciepła, intensywnie wpływających na wartości oraz rozkłady temperatur wsadów nagrzewanych indukcyjnie. Wpływ wzbudnika na rozkłady temperatury badano dla zróżnicowanych grubości szczeliny powietrznej w granicach 1 ÷ 100 mm. Rozkłady temperatury w funkcji wysokości na zewnętrznej powierzchni wsadu (w jego centralnej części pod wzbudnikiem) pokazano na rysunku 7.



Rys. 6. Modele do analiz konwekcyjnej wymiany ciepła: a) dla pól przepływowych; b) dla analiz kryterialnych. (a) – zerowa prędkość płynu; (b) – źródło ciepła; (c) – temperatura otoczenia; (d) współczynnik przyjmowania ciepła, (e) – temperatura wzбудnika



Rys. 7. Rozkłady temperatury na powierzchni wsadu dla zróżnicowanych odległości pomiędzy wzбудnikiem i wsadem. a) 1 mm; b) 10 mm; c) 50 mm; d) 100 mm

Wykorzystane obliczenia umożliwiły stwierdzenie zgodności modeli przepływowych oraz kryterialnych na akceptowalnym poziomie. Dla modeli z szczelinami powietrznymi mniejszymi od 10 mm, maksymalne różnice nie przekraczały 10%. Dodatkowo charakter rozkładu temperatury był zbliżony. Dla szczelin w granicach 1 – 4 mm obserwowane były znaczne spadki temperatury pod każdym zwojem wzbudnika. Dla szczelin o większych wymiarach, efekty lokalne, związane z poszczególnymi zwojami nie były obserwowane. Uzyskano odmienny charakter rozkładu temperatury, wynikający z braku analizy lokalnych współczynników przejmowania ciepła w modelu uproszczonym (zmienna grubość warstwy przyściennej). Pomimo tego efektu, uzyskane wyniki charakteryzowały się akceptowalną dokładnością i proponowany model może być z powodzeniem stosowany w analizach konwekcyjnej wymiany ciepła w układach do nagrzewania indukcyjnego.

4. WYMIANA CIEPŁA PRZEZ PROMIENIOWANIE

Radiacyjna wymiana ciepła jest zjawiskiem dominującym, zwłaszcza w wysokich temperaturach charakterystycznych dla analizowanych układów nagrzewania indukcyjnego. Klasycznym sposobem obliczania mocy wymienianej przez promieniowanie jest wykorzystanie zależności typu (7). Zastępczy współczynnik konfiguracji (φ_{A-B}^*) obejmuje parametry geometryczne i materiałowe układu wymieniającego ciepło przez promieniowanie.

$$P_{A \rightarrow B} = \sigma_0 \cdot F_A \cdot \varphi_{A \rightarrow B}^* \cdot (T_A^4 - T_B^4) \quad (7)$$

gdzie: σ_0 – stała Steffana–Boltzmana; F_A – wielkość powierzchni promieniującej A ; φ_{A-B}^* – zastępczy współczynnik konfiguracji.

W zaawansowanych współczesnych systemach obliczeniowych zaimplementowano algorytm obliczeń radiacyjnej wymiany ciepła oparty o bilansowanie energii wymienianej przez elementy należące do promieniujących powierzchni, oparty o zależność typu (8). W odróżnieniu od podejścia klasycznego (7), możliwe jest uwzględnienie tzw. wielokrotnych odbić promieniowania.

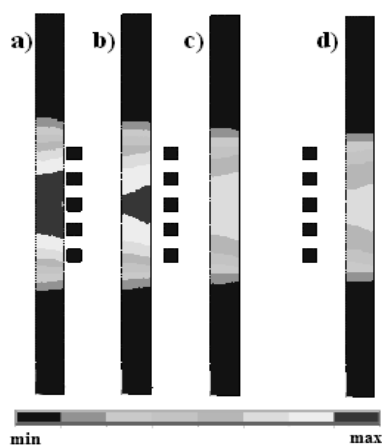
$$\sum_{i=1}^N \left(\frac{\delta_{i,j}}{\varepsilon_i} - \varphi_{i,j} \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i} \right) \frac{1}{F_i} P_i = \sum_{i=1}^N (\delta_{i,j} - \varphi_{ij}) \sigma_0 T_i^4 \quad (8)$$

gdzie: $\delta_{i,j}$ – delta Kroneckera; P_i – moc dostarczana do powierzchni o numerze i .

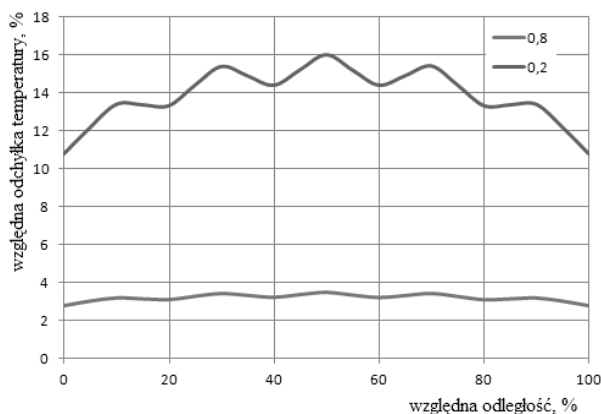
Celem analiz wykonanych w niniejszym rozdziale było dokonanie oceny warunków, w których możliwe jest wykorzystanie modelu uproszczonego (nieuwzględniającego odbić wielokrotnych) zjawiska radiacyjnej wymiany ciepła. Obliczenia wykonywano w stanach ustalonych, przy uwzględnianiu strat ciepła jedynie przez promieniowanie. Zastosowano wymuszenie stałą mocą grzejną wydzielaną we wsadzie. Na rysunku 8 pokazano pola temperatury w przekroju

układu grzejnego dla zróżnicowanych odległości pomiędzy wzbudnikiem i wsadem. Układem odniesienia był model bez analizy wzbudnika (rys. 8d).

Wraz z minimalizacją wymiarów szczeliny powietrznej, intensyfikowane są zjawiska związane z odbiciami promieniowania od wzbudnika. Z tego powodu, dla mniejszych szczelin, temperatura osiągnięta przy stałej mocy grzejnej jest wyższa. W celu jakościowej oceny tego wpływu, na rysunku 9 pokazano rozkład względnych odchyłek temperatury dla modelu uwzględniającego odbicia wielokrotne, w stosunku do modelu uproszczonego, na powierzchni wsadu w strefie grzejnej (d na rys. 8). Analizy wykonano dla grubości szczeliny powietrznej wynoszącej 2 mm, dla dwóch emisyjności wzbudnika (0,2 i 0,8).



Rys. 8. Względny rozkład temperatury w przekroju układu grzejnego dla zróżnicowanych odległości pomiędzy wsadem i wzbudnikiem



Rys. 9. Rozkład względnych odchyłek temperatury na powierzchni wsadu dla modeli uwzględniających odbicia wielokrotne w stosunku do modelu podstawowego, bezodbiciowego

Przy niskich emisyjnościach wzbudnika efekty związane z odbiciami promieniowania cieplnego stają się bardziej istotne. Efekt ten widoczny jest przede wszystkim w aspekcie ilościowym. Znaczący wzrost temperatury w stosunku do podstawowego modelu nie uwzględniającego odbić wynika z efektu lustrzanego. Dodatkowo, w tym przypadku, widoczna jest również zmiana charakteru rozkładu temperatury. W zależności od konfiguracji i kształtu wzbudnika, efekty odbić promieniowania mogą istotnie determinować charakter rozkładu temperatury. Stosowanie uproszczonej procedury obliczeń radiacyjnej wymiany ciepła (bez uwzględniania efektu odbić promieniowania) może w niektórych indukcyjnych systemach grzejnych prowadzić do znaczących błędów. Efekt ten jest szczególnie widoczny w przypadku układów o zminimalizowanych grubościach szczelin powietrznych oraz wzbudnikach nieizolowanych (nieutleniona miedź o niskiej emisyjności). Procedura uproszczona może być stosowana dla szczelin powietrznych o grubościach przekraczających 5 mm (dla wzbudników izolowanych) oraz 30 mm dla wzbudników z miedzi o gładkiej powierzchni.

5. PODSUMOWANIE

W niniejszej pracy omówiono podstawowe zagadnienia dotyczące modelowania zjawisk wymiany ciepła w układach grzejnych wzbudnik – wsad, przeznaczonych do skrośnego nagrzewania indukcyjnego. Analizowano równania opisujące wymianę ciepła przez przewodzenie, konwekcję i radiację. Głównym celem prezentowanych rozważań była ocena możliwości upraszczania rozwiązań, skutkująca możliwością wykonywania przyspieszonych analiz. Zaproponowano modele wymiany ciepła, umożliwiające uzyskiwanie wyników modelowania układów do nagrzewania indukcyjnego z zadowalającą dokładnością. Wyniki uzyskane przy użyciu tych uproszczonych modeli porównano z wynikami modeli dokładnych. Wyznaczono błędy oraz określono granice stosowalności proponowanych uproszczeń, zarówno w zakresie parametrów geometrycznych, jak i materiałowych układów do nagrzewania indukcyjnego. W pracy nie podano wpływu uproszczeń wprowadzanych przez parametry materiałowe oraz modele zagadnień elektromagnetycznych. Rozważania te stanowią przedmiot innych publikacji.

LITERATURA

- [1] Nacke B., Wrona E.: Numerical Simulation Methods for Design of Complex Induction Hardening Problems by Means of Numerical Simulation, *Archives of Electrical Engineering*, Vol. 54 nr 4–2005, ISSN 0004–0746.
- [2] Drachev R., Deyneka E., Rhodes C., Schupp J., Sudarshan T.: Fundamental Limitations of SiC PVT Growth Reactors with Cylindrical Heaters, *Material Science Forum Vols. 527–529* (2006), pp. 15–20.

- [3] Hauser J.: Elektrotechnika: Podstawy elektrotermii i techniki świetlnej. WPP, 2006.
- [4] www.ansys.com (dostęp: 5. 03. 2016).
- [5] <http://www.cedrat.com/en/software/flux.html> (dostęp: 5. 03. 2016).

THERMAL PARAMETERS INFLUENCE ON ACCURACY OF INDUCTION HEATING PROCESS MODELING

Simulations of induction heating systems requires, in all cases, coupled computations of electromagnetic and thermal phenomena. In practice, a large number of different models and procedures are used to design the inductor – workpiece heating systems. Due to practical possibility of precise comparison between simulation and physical measurements results, the induction heating is very interesting. However, in many cases, simplifications of used mathematical models and material parameters lead to increase of simulations errors. In this article basic mathematical models of heat transfer phenomena in volumetric induction heating systems were presented. During calculations, results obtained using full models of thermal conduction, convection and radiation were compared to simplified authors models. Errors and the scope of applicability of simplified models were determined and discussed.

(Received: 7. 03. 2016, revised: 9. 03. 2016)