

ADAM CIEŚLAK, JERZY ZGRAJA

Politechnika Łódzka, Instytut Informatyki Stosowanej

WYKORZYSTANIE IMPULSOWEJ METODY FLASH DO OKREŚLANIA DYFUZYJNOŚCI CIEPLNEJ INDUKCYJNIE NAGRZEWANYCH PRÓBEK WSADU

Opracowanie poświęcono analizie możliwości wykorzystania metody impulsowej Flash do wyznaczenia dyfuzyjności cieplnej materiału w układzie nagrzewania indukcyjnego. Analizie poddano próbki walcowe wsadu nagrzewane w układzie: „od czola” i „od boku”. Przedstawiono zależność umożliwiającą wyznaczenie dyfuzyjności cieplnej w metodzie Flash przy radialnym przepływie ciepła wewnątrz nagrzewanej próbki walcowej.

WPROWADZENIE

W procesach technologicznych, takich jak nagrzewanie indukcyjne, znajomość parametrów materiałowych pozwala ocenić możliwości zastosowania danego materiału, jak również wykorzystać symulacje komputerowe zachodzących zjawisk. W praktyce przemysłowej wskazane jest aby proces identyfikacji parametrów materiałowych mógł być zrealizowany przy możliwie małych nakładach finansowych, najlepiej w zakładzie i to bez potrzeby zatrudniania wyspecjalizowanych fachowców. Niniejsza praca stanowi wstępną próbę poszukiwania takiego rozwiązania dla procesów nagrzewania indukcyjnego, w zakresie dotyczącym dyfuzyjności cieplnej wsadu. Jedną z metod stosowanych w technice do wyznaczania dyfuzyjności cieplnej jest metoda Flash, która stanowi odmianę falowej metody Ångströma [1]. Jest ona oparta na badaniu czasowej odpowiedzi temperaturowej płaskiej próbki materiału poddanej jednostronnemu, impulsowemu nagrzewaniu strumieniem świetlnym [2].

Przedmiotem niniejszego opracowania jest przedstawienie analizy możliwości implementacji impulsowej metody Flash do wyznaczenia dyfuzyjności cieplnej przewodzących elektrycznie wsadów, przy wykorzystaniu nagrzewania indukcyjnego. Badania dotyczą zarówno samej możliwości zastosowania nagrzewania indukcyjnego jako źródła wymuszenia sygnału cieplnego, jak i możliwość wykorzystania próbek wsadu o kształcie cylindrycznym, łatwym zarówno do fizycznego wykonania, jak i stosunkowo łatwym (2D) do symulacji komputerowej zachodzących zjawisk elektromagnetyczno-cieplnych.

1. POMIAR DYFUZYJNOŚCI CIEPLNEJ METODĄ FLASH

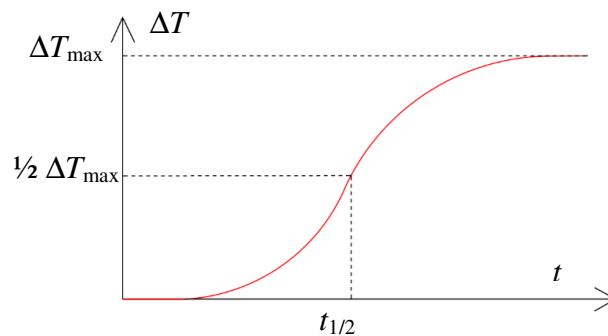
Pojęcie dyfuzyjności cieplnej α określonej zależnością:

$$\alpha = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \quad (1)$$

gdzie: λ – przewodność cieplna właściwa, c – ciepło właściwe, ρ – gęstość,

wyraża związek zachodzący między przewodnością cieplną właściwą i ciepłem właściwym materiału. Metoda Flash jest jedną z metod stosowanych do pomiaru tej wielkości. Została ona zaproponowana przez W.J. Parkera w 1961 roku. Polega na podaniu impulsu promieniowania elektromagnetycznego o charakterze możliwie bliskim impulsowi Diraca na jedną stronę próbki płaskiej, a następnie na rejestracji zmian temperatury na drugiej stronie. Z uwagi na wymagany charakter impulsu, jako źródło promieniowania najczęściej wykorzystywana jest wiązka lasera o określonej energii.

Wartość dyfuzyjności cieplnej określa się na podstawie czasowego przebiegu temperatury na przeciwnej do nagrzewanej stronie próbki (Rys. 1) i wyznaczeniu czasu $t_{1/2}$ osiągnięcia temperatury połowicznej, według zależności (2) [2]:



Rys. 1. Charakterystyka czasowa temperatury badanej próbki

$$\alpha = 1,38 \cdot \frac{L^2}{\pi^2 \cdot t_{\frac{1}{2}}} \quad (2)$$

gdzie: L – grubość próbki wsadu.

Dotychczas w literaturze przedstawiono implementacje pomiarowej metody Flash wykorzystujące pierwotną ideę metody, w których jako źródło wymuszające zastosowano źródło z zakresu widzialnego promieniowania elektromagnetycznego, tj. halogenowe źródło światła, wiązkę lasera. Przykładem implementacji, w której wykorzystano technologię nagrzewania indukcyjnego jest praca

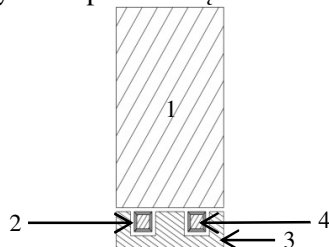
B. Hay'a i innych [3], w której badaną próbkę kształtu cylindrycznego umieszczono w piecu indukcyjnym służącym wyłącznie do zmiany poziomu temperatury próbki.

2. IMPLEMENTACJE METODY FLASH WYKORZYSTUJĄCE NAGRZEWANIE INDUKCYJNE

Układ z nagrzewaniem od „czoła”

Metoda Flash została opracowana dla przypadku jednokierunkowego przepływu ciepła w układzie płaskim. Dla analizowanego, cylindrycznego kształtu próbki odpowiada to napromieniowywaniu „od czoła” z pomiarem temperatury po stronie przeciwnej czoła walca. Schemat ideowy takiego rozwiązania dla nagrzewania indukcyjnego przedstawiono na Rys. 2. Do celów obliczeniowych wykorzystano komercyjny program Flux firmy CEDRAT do sprzężonych poleowych obliczeń elektromagnetyczno-ciepłych.

Jednym z celów realizowanych badań była analiza wrażliwości metody na parametry materiałowe i geometryczne próbki. W tym celu dokonano analizy obliczeniowej dla dwóch próbek o różnej wysokości: 30 i 50 mm oraz dwóch materiałów o przewodności cieplnej odpowiednio: 40 i 400 W/(m K). Dodatkowo wykonana została analiza wpływu czasu trwania impulsu wymuszającego, wysokości punktu pomiarowego temperatury oraz układu wymuszonego chłodzenia (po przeciwnej stronie nagrzewanego walca) poprawiającego jednokierunkowy charakter przepływu ciepła wewnątrz wsadu.



Rys. 2. Schemat ideowy układu nagrzewania „od czoła” próbki wsadu
1 – wsad, 2 – wzbudnik, 3 – bocznik magnetyczny, 4 – płyn chłodzący

W Tabeli 1 przedstawiono zestawienie wyników, dla dwóch wysokości próbek wsadu 30 i 50 mm i czasów impulsu wymuszającego $\Delta t = 0,2$ i $0,3$ s.

Na podstawie przedstawionych wyników można stwierdzić, że wpływ czasu Δt trwania wymuszenia na niedokładność otrzymanych wyników jest szczególnie zauważalny dla wsadów o wyższej przewodności cieplnej (krótki czas połowiczny). W celu zobrazowania wpływu umiejscowienia punktu pomiarowego temperatury na dokładność szacowania dyfuzyjności cieplnej, w Tabeli 2 przedstawiono wyniki takiej analizy przy wymuszeniu trwającym $0,2$ s.

Tabela 1. Wyniki obliczeń dla różnych wariantów wysokości i czasu trwania impulsu

Wysokość wsadu [mm]	Przewodność cieplna λ [W/m/K]	Wymuszenie Δt [s]	Założona dyfuzyjność α [m ² /s]	Obliczona dyfuzyjność α_{obl} [m ² /s]	Czas połowiczny $t_{1/2}$ [s]	Błąd $ \alpha - \alpha_{obl} /\alpha$ [%]
30	40	0,2	$1,026 \cdot 10^{-5}$	$1,241 \cdot 10^{-5}$	4,51	20,91
		0,3		$1,227 \cdot 10^{-5}$	4,56	19,58
50		0,2		$1,112 \cdot 10^{-5}$	5,03	8,41
		0,3		$1,101 \cdot 10^{-5}$	5,08	7,34
30	400	0,2	$1,026 \cdot 10^{-4}$	$1,017 \cdot 10^{-4}$	0,55	0,89
		0,3		$9,390 \cdot 10^{-5}$	0,60	8,48
50		0,2		$9,231 \cdot 10^{-5}$	0,61	10,03
		0,3		$8,523 \cdot 10^{-5}$	0,66	16,93

Tabela 2. Wyniki analizy obliczeniowej dla różnych odległości punktu pomiaru temperatury od nagrzewanego czoła próbki

Wysokość wsadu [mm]	Przewodność cieplna λ [W/m/K]	Wysokość pomiaru temperatury [mm]	Założona dyfuzyjność α [m ² /s]	Obliczona dyfuzyjność α_{obl} [m ² /s]	Błąd $ \alpha - \alpha_{obl} /\alpha$ [%]
30	40	10	$1,026 \cdot 10^{-5}$	$1,250 \cdot 10^{-5}$	21,84
		20		$1,241 \cdot 10^{-5}$	20,91
50		10		$1,250 \cdot 10^{-5}$	21,87
		20		$1,112 \cdot 10^{-5}$	8,41
		30		$1,138 \cdot 10^{-5}$	10,91
30		400		10	$1,026 \cdot 10^{-4}$
	20		$1,017 \cdot 10^{-4}$	0,89	
50	10		$6,991 \cdot 10^{-5}$	31,86	
	20		$9,231 \cdot 10^{-5}$	10,03	
	30		$1,035 \cdot 10^{-4}$	0,87	

Na podstawie przedstawionych powyżej wyników można stwierdzić, że rezultaty uzyskane dla próbki o $\lambda = 400$ W/(m K) są na ogół przeszacowane (zbyt duże), a dla wsadu o $\lambda = 40$ W/(m K) niedoszacowane. Zwiększenie drogi dyfuzji strumienia ciepła przez wsad zwiększa dokładności wyniku w obu przypadkach (choć występuje tu ograniczenie odległości punktu pomiarowego związane ze wzrostem strumienia rozproszenia).

Przedstawione powyżej rezultaty dotyczą modelu z wymuszonym chłodzeniem wsadu. W celu uproszczenia konstrukcji układu pomiarowego analizie został poddany również układ bez wymuszonego chłodzenia, w którym przyjęto istnienie izolacji cieplnej powierzchni bocznej oraz powierzchni czołowej od strony nagrzewania. Przykładowe wyniki przedstawiono w Tabeli 3.

Tabela 3. Zestawienie wyników dla układu bez wymuszonego chłodzenia

Wysokość wsadu [mm]	Przewodność cieplna λ [W/m/K]	Wysokość pomiaru temperatury [mm]	Założona dyfuzyjność α [m ² /s]	Obliczona dyfuzyjność α_{obl} [m ² /s]	Błąd $ \alpha - \alpha_{obl} /\alpha$ [%]
50	40	10	$1,026 \cdot 10^{-5}$	$1,261 \cdot 10^{-5}$	22,88
		20		$1,095 \cdot 10^{-5}$	6,70
		30		$9,11 \cdot 10^{-6}$	11,18
	400	10	$1,026 \cdot 10^{-4}$	$6,755 \cdot 10^{-5}$	34,17
		20		$9,245 \cdot 10^{-5}$	9,90
		30		$8,334 \cdot 10^{-5}$	18,78

Porównując wyniki z Tabeli 2 i 3 łatwo zauważyć wpływ usunięcia układu chłodzenia. Mimo to otrzymane rezultaty zawierają się w przedziale 20% błędu. Jedynie dla wsadu o $\lambda = 400$ W/(m K) i wysokości punktu pomiaru temperatury 10 mm wynik był poza tym zakresem.

Układ z nagrzewaniem od „boku”

Jako układ „od boku” przyjęto konfigurację geometryczną, w której przepływ strumienia ciepła następuje radialnie w kierunku osi symetrii cylindra, co zmienia opisywany w literaturze model matematyczny metody Flash. Opisywany model zakłada wykorzystanie próbki płaskiej i zachowanie jednokierunkowego przepływu ciepła. W układzie nagrzewania „od boku” zastosowanie tej metody wymaga wyznaczenia zależności opisującej radialny przepływ strumienia ciepła. W literaturze spotyka się opracowania [4, 5] dotyczące zastosowania metody Flash przy impulsie kierowanym na powierzchnię boczną walca, nie dotyczy to jednak radialnego przepływu strumienia ciepła. Należy zauważyć, że według opracowań [4, 5, 6] czas połowiczny $t_{1/2}$ zależy tylko i wyłącznie od dyfuzyjności cieplnej a oraz drogi przepływu strumienia cieplnego R , co można przedstawić zależnością:

$$t_{\frac{1}{2}} = A \cdot \frac{R^2}{\alpha} \quad (3)$$

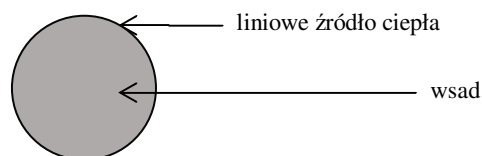
gdzie: A – współczynnik charakterystyczny dla danego modelu obliczeniowego.

Przyjmując poprawność zależności (3) również w analizowanym przypadku nagrzewania „z boku” przeprowadzono próbę obliczeniowego wyznaczenia wartości współczynnika A. Obliczenia oparto o symulacje numeryczne, a nie rozważania analityczne, co prowadzi do otrzymania dyskretnych wartości współczynnika A. W celu zwiększenia poprawności badania analizie obliczeniowej poddano pięć typowych materiałów wsadu o zróżnicowanych parametrach materiałowych, które przedstawiono w Tabeli 4.

Tabela 4. Parametry materiałowe analizowanych wsadów

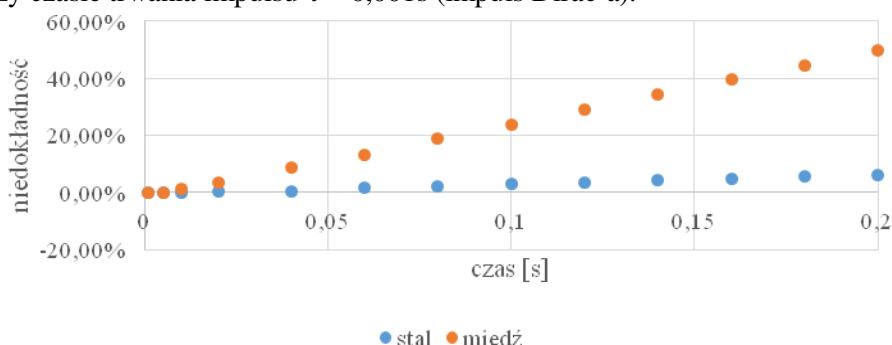
Materiał	μ_r	ρ_e	λ	c	ρ
	[-]	[$\Omega \cdot m$]	[W/m/K]	[J/kg/K]	[kg/m ³]
Cu	0,999994	$1,67785 \cdot 10^{-8}$	401	380	8920
Al	1,00002	$2,65252 \cdot 10^{-8}$	237	900	2700
Stal	100	$1,7100 \cdot 10^{-7}$	58	466	7860
Tytan	1,000075	$4,2735 \cdot 10^{-7}$	21,9	520	4507
Grafit	0,999984	$3,75 \cdot 10^{-6}$	140	710	2267

Obliczenia współczynnika A zrealizowano dla modelu numerycznego 1D przekroju kołowego wsadu walcowego (rys. 3). W celu uniknięcia nierównomierności nagrzewania, zastosowano liniowe źródło ciepła po obwodzie wsadu, o określonej mocy.



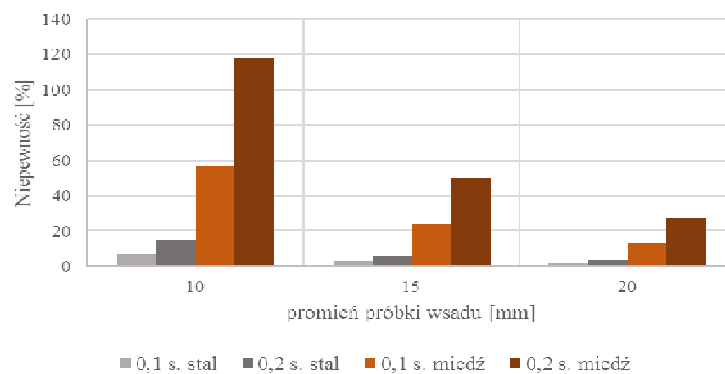
Rys. 3. Model numeryczny „teoretycznego” układu odwzorowującego radialny przepływ ciepła

Obliczenia współczynnika A były realizowane przy wykorzystaniu wzoru (3), w którym czas połowiczny $t_{1/2}$ wyznaczano symulacyjnie przy założonych parametrach materiałowych (określonej dyfuzyjności a) a wartość dyfuzyjności cieplnej przyjmowano równą wartości użytej w symulacji. Na rys. 4 przedstawiono zależność niedokładności wyznaczenia współczynnika A w postaci błędu względnego odniesionego do wartości $A_{0,001}$ uzyskanej (dla różnych materiałów) przy czasie trwania impulsu $\tau = 0,001s$ (impuls Dirac’a).



Rys. 4. Zależność niedokładności wyznaczenia A od czasu trwania impulsu

Analiza wpływu mocy źródła powierzchniowego pozwala stwierdzić, że wraz z jej wzrostem niedokładność wyznaczenia A jest większa. Występujący błąd jest jednak niewielki i przy zmianie mocy z 250 W do 1000 W wzrosła o ok. 2,5%. Dla impulsu wymuszającego dalekiego od impulsu Dirac'a wpływ promienia próbki wsadu na dokładność osiągniętych rezultatów jest znaczny. Na rys. 5 przedstawiono, dla dwóch czasów trwania impulsu, wartość niedokładności wyznaczenia A dla dwóch materiałów: stali i miedzi ze względu na wartość promienia.



Rys. 5. Wpływ wartości promienia próbki wsadu na dokładność wyznaczenia współczynnika A

Przeprowadzone obliczenia i analiza wyników jednoznacznie pozwalają stwierdzić, że (przy technicznie realizowanych czasach trwania impulsu wymuszenia) wartość średnicy wsadu walcowego ma znaczny wpływ na uzyskany wynik. Wraz ze wzrostem promienia próbki, czyli wydłużeniem drogi, którą przebywa strumień ciepła obserwuje się zmniejszenie niepewności wyznaczenia współczynnika A. Korzystnym zatem wydaje się zwiększenie średnicy walca, choć prowadzi to jednocześnie do zmniejszenia mierzonego przyrostu temperatury. Przedstawiona powyżej analiza teoretyczna posłużyła do wyznaczenia wartości współczynnika $A = 0,1073$ i sformułowaniu zależności na czas połowiczny dla przypadku radialnego przepływu ciepła:

$$t_{\frac{1}{2}} = 0,1073 \cdot \frac{R^2}{\alpha} \quad (4)$$

Dodatkowo stwierdzono, że w celu uzyskania najmniej wrażliwego na rodzaj materiału sposobu prowadzenia badań należy stosować:

- możliwie najkrótszy, technicznie możliwy, czas trwania impulsu mocy;
- moc impulsu możliwie dużą, na poziomie (500÷1000) W;
- promień wsadu możliwie duży, przy zachowaniu odpowiedniego przyrostu temperatury.

3. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych symulacji i wykonanych obliczeń stwierdzono realną możliwość zastosowania metody Flash w układzie nagrzewania indukcyjnego w celu wyznaczenia dyfuzyjności cieplnej materiału. Wyznaczona zależność (4) uwzględniająca radialny przepływ ciepła wewnątrz walcowego wsadu umożliwia wykorzystanie układu nagrzewania „od boku” do wyznaczania charakterystyk temperaturowych dyfuzyjności (określanie dyfuzyjności na różnych poziomach temperatury wsadu), a w dalszej perspektywie również charakterystyk przewodności cieplnej materiałów.

LITERATURA

- [1] Ångström A.J.: Phil. Mag. 25, 130, 1863.
- [2] Parker W.J., Jenkins R.J., Butler C.P., Abbott G.L., Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity, and Thermal Conductivity, J. Appl. Phys. 32, 1679, 1961.
- [3] Hay B., Hameury J., Nolwenn F., Laciopiere P., Grelard M., Scoarnec V., Davee G.: New Facilities for the Measurements of High-Temperature Thermophysical Properties at LNE, International Journal of Thermophysics, Springer Science, New York 2013.
- [4] Salazar A., Garrido F., Celorrio R., Thermal diffusivity of rods, tubes, and spheres by the flash method, J. Appl. Phys. 99, 066116, 2006.
- [5] Salazar A., Apinaniz E., Massot M., Oleaga A., Application of the flash method to rods and tubes, Eur. Phys. J. Special Topics 153, 83-86, 2008.
- [6] Hering M., Termokinetyka dla elektryków, WNT, Warszawa 1980.

Praca współfinansowana ze środków NCBiR w ramach projektu Badań Stosowanych nr umowy PBS1/A4/2/2012.

PULSE METHOD FOR ESTIMATION THERMAL PROPERTIES OF INDUCTION HEATED CHARGE

SUMMARY

The study was devoted to analysis of possibility of using the impulse Flash method for determination thermal diffusivity of induction heated charge. Two set-up's was analysed: "natural" and "side". A process of determination the relation taking the radial heat flow into account was described.

Keywords: dyfuzyjność cieplna, metoda flash, metody odwrotne, radialny przepływ ciepła, thermal diffusivity, flash method, indirect method, radial heat flow.