

Marcin WESOŁOWSKI*
Adam CZAPLICKI*
Przemysław SKRZYPCZAK**

EFEKTYWNOŚĆ POŚREDNIEGO I BEZPOŚREDNIEGO NAGRZEWANIA MATERIAŁÓW CIENKOWARSTWOWYCH

Nagrzewanie materiałów cienkowarstwowych (np. folii), z uwagi na znaczną wielkość powierzchni styku z otoczeniem, charakteryzuje się zazwyczaj stosunkowo niskimi sprawnościami. Pomimo tego faktu, techniki wykorzystujące tego rodzaju grzejnictwo znajdują coraz szersze zastosowanie. W niniejszej pracy analizie poddano możliwość wykorzystania grzejnictwa indukcyjnego oraz promiennikowego w procesie nagrzewania aluminiowej taśmy, charakterystycznej dla opakowań kartonowych. Podano model matematyczny układów grzejnych oraz zaprezentowano wyniki obliczeń wykonanych przy wykorzystaniu autorskiego algorytmu. Ostatecznym rezultatem wykonanych analiz było wyznaczenie sprawności procesu nagrzewania indukcyjnego oraz porównanie go do klasycznych metod pośrednich.

KEYWORDS: folia aluminiowa, nagrzewanie, modelowanie

1. WPROWADZENIE

Opakowania kartonowe wykorzystywane są do przechowywania cieczy, stanowiąc konkurencję dla opakowań szklanych oraz PET. Opakowania tego typu składają się z celulozy, polietylenu oraz folii aluminiowej, o grubości rzędu 10 μm . Recykling celulozy nie stanowi istotnego problemu z punktu widzenia opłacalności. Najbardziej energochłonnym procesem jest odzysk folii aluminiowej, pokrytej obustronnie warstwą polietylenu. Zazwyczaj proces degradacji polietylenu realizowany jest poprzez nagrzewanie materiału do temperatury rzędu 300°C. Z punktu widzenia zapotrzebowania energetycznego, nagrzanie 1 kg aluminium w warunkach bezstratnych wymaga dostarczenia około 0,5 kWh, łącznie z procesem wygrzewania, wymaganym do depolimeryzacji. Możliwy jest zatem opłacalny odzysk aluminium, pod warunkiem konstrukcji wysokosprawnych urządzeń oraz technologii.

* Politechnika Warszawska.

** Politechnika Poznańska.

W niniejszym artykule zaprezentowano wyniki prac obliczeniowych procesu nagrzewania folii aluminiowych w urządzeniach elektrotermicznych wykorzystujących nagrzewanie indukcyjne i promiennikowe. Celem artykułu jest prezentacja problematyki efektywnej symulacji nagrzewania materiałów cienkowarstwowych oraz określenie podstawowych parametrów urządzeń mogących być wykorzystywanymi do realizacji tytułowej technologii. Zaprezentowano autorskie modele i procedury obliczeniowe, łącznie z podaniem cech charakterystycznych analizowanych rozwiązań. Porównano sprawności uzyskiwane podczas symulacji, co umożliwiło określenie najbardziej racjonalnego rozwiązania.

2. MODEL NAGRZEWNICY INDUKCYJNEJ

Typowe, charakterystyczne rozwiązania indukcyjnych urządzeń grzejnych z polem podłużnym nie są zazwyczaj wykorzystywane do nagrzewania wsadów cienkowarstwowych. Podstawowym powodem takiego stanu jest konieczność wykorzystywania wysokich częstotliwości. Jak wynika z podstaw teoretycznych, wymiar wsadu w kierunku wnikania energii [1] w takich układach powinien spełniać warunek określony zależnością (1), co gwarantuje utrzymanie sprawności procesu grzejnego na akceptowalnym poziomie.

$$h > \sim 3 \cdot \delta = 3 \sqrt{\frac{2 \cdot \rho}{\omega \cdot \mu}} \quad (1)$$

gdzie: h – grubość materiału (płyty) w kierunku wnikania pola, $h > \sim 3\delta$, δ – zastępcza głębokość wzbudzenia, ρ – rezystywność, μ – przenikalność magnetyczna, ω – pulsacja, δ – zastępcza głębokość wnikania.

W układach z polem podłużnym, prądy indukowane po przeciwnych stronach wsadu mają przeciwne zwroty. Zgodnie z analizą teoretyczną, w środku grubości wsadu prąd nie płynie. Rozwiązanie podstawowych równań pola umożliwia podanie zależności (2), opisującej moc czynną wydzielaną we wsadzie płaskim o jednostkowym przekroju, umieszczonym w polu podłużnym, ze znanym powierzchniowym natężeniem pola magnetycznego [1].

$$P = \frac{H_F^2}{2\gamma \cdot \delta} \cdot \frac{\sinh\left(\frac{h}{\delta}\right) - \sin\left(\frac{h}{\delta}\right)}{\cosh\left(\frac{h}{\delta}\right) + \cos\left(\frac{h}{\delta}\right)} \quad (2)$$

gdzie: H_F – natężenie pola magnetycznego na powierzchni płyty, h – grubość płyty, γ – konduktywność.

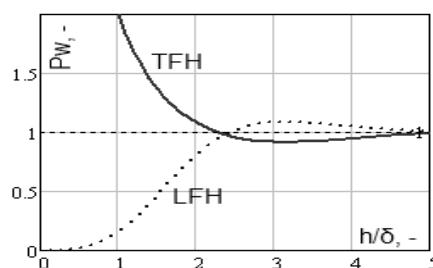
Funkcja opisana zależnością (2) posiada maksimum, przy spełnieniu warunku $h/\delta \sim 3$, co wymusza wykorzystywanie wysokich częstotliwości gwarantujących uzyskiwanie znacznych gęstości mocy. W przypadku indukcyjnego na-

grzewania wsadów cienkowarstwowych, znacznie korzystniejsze wydaje się wykorzystywanie układów z polem poprzecznym (TFH). Za najważniejsze zalety tego rodzaju rozwiązań uważa się [2]:

- wysoką sprawność oraz gęstość mocy;
- możliwość stosowania niskich częstotliwości.

Analogicznie do zależności obowiązujących dla układów z polem podłużnym, możliwe jest określenie podstawowych wielkości opisujących układy TFH (3). Zależności względnych mocy dla dwóch rozwiązań pokazano na rysunku 1. Wyniki obowiązują dla przypadku stałego natężenia pola magnetycznego na powierzchni wsadu i nie uwzględniają współpracy układu wzbudnik – wsad z rzeczywistym źródłem zasilania.

$$P = \frac{H_F^2}{2\gamma \cdot \delta} \cdot \frac{\sinh\left(\frac{h}{\delta}\right) + \sin\left(\frac{h}{\delta}\right)}{\cosh\left(\frac{h}{\delta}\right) - \cos\left(\frac{h}{\delta}\right)} \quad (3)$$

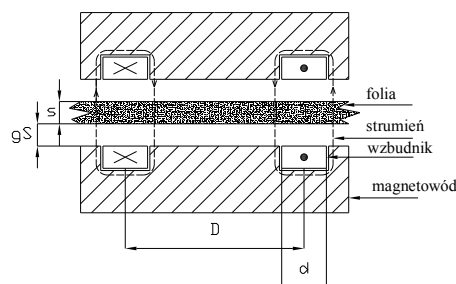


Rys. 1. Charakterystyki mocy względnej przy nagrzewaniu w układzie z polem podłużnym (LFH) oraz poprzecznym (TFH), w funkcji względnej grubości wsadu

W przypadku wykorzystania układu z polem poprzecznym (TFH), wartości mocy rosną wraz z zmniejszaniem stosunku grubości wsadu do głębokości wnikiwania, co świadczy o możliwości wykorzystywania relatywnie niskich częstotliwości przy nagrzewaniu wsadów cienkowarstwowych. Zwraca się jednak uwagę na pewną niezgodność proponowanego opisu, skutkującą nadmiernym wzrostem mocy przy zmniejszaniu częstotliwości.

Układy grzejne z polem poprzecznym charakteryzują się jednak złożonością zjawisk związanych z propagacją pola elektromagnetycznego oraz wpływem parametrów materiałowych i geometrycznych na rozkłady mocy, skutkującymi brakiem łatwego opisu wspomagającego projektowanie urządzeń tej klasy. Powszechną praktyką jest wykonywanie symulacji 3D, co wiąże się z długim czasem analiz, procesu optymalizacji i doboru źródeł zasilania. W analizowanym zagadnieniu nagrzewania folii aluminiowych w układzie z polem poprzecznym, najistotniejsze zadania dotyczyły doboru średnicy podziałowej wzbudników oraz

średnicy przewodów wzbudnika, wymiarów szczeliny powietrznej i zakresu częstotliwości roboczych. Przyjęto geometrię modelu, zgodnie z rysunkiem 2.



Rys. 2. Układ do nagrzewania indukcyjnego folii aluminiowych

W celu zagwarantowania wysokiej sprawności procesu grzejnego oraz intensyfikacji składowej normalnej pola magnetycznego, należy maksymalnie ograniczać wymiary szczeliny powietrznej. Przyjęto, że w analizowanym przypadku powinna być spełniona zależność (4) [2]. Zastosowano wzbudnik o średnicy podziałowej 90 mm, wobec czego maksymalna grubość szczeliny powietrznej może wynosić 22,5 mm.

$$\frac{2 \cdot gS}{D} \leq 0.5 \quad (4)$$

gdzie: D – średnica podziałowa wzbudnika, gS – grubość szczeliny powietrznej.

Istotnym zagadnieniem wpływającym na warunki pracy urządzenia jest dobór częstotliwości roboczej. Optymalna częstotliwość może być określona na podstawie zależności (5) [3]. Wykorzystując przyjęte parametry układu grzejnego, zakres częstotliwości zawiera się w granicach 136 Hz – 617 Hz.

$$f = 2.1 \cdot 10^6 \cdot \frac{\rho}{D^2} \cdot \frac{gS}{0.5s} \cdot \left(\frac{2gS}{D} \right) k \quad (5)$$

gdzie: k – współczynnik korekcyjny przyjmujący wartości w zakresie 0,42 – 1,9, s – grubość wsadu.

Wymiary wzbudnika określone szerokością przewodu (d) oraz średnicą podziałową (D) powinny spełniać warunek (6). Nadmierne zwiększenie szerokości przewodu powoduje bardziej równomierny rozkład natężenia pola na powierzchni wsadu, lecz równocześnie zmniejsza wartość mocy cieplnej.

$$0.4 \leq \frac{c_p}{D} \leq 0.75 \quad (6)$$

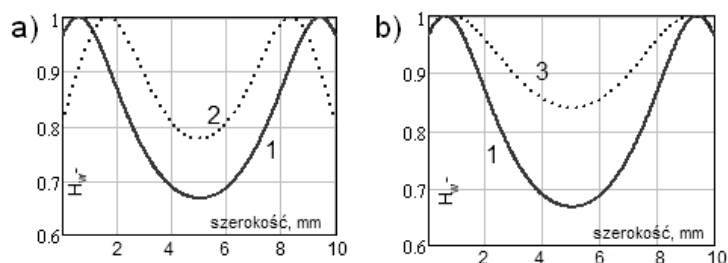
Wymienione parametry geometryczne wraz z zależnościami opisującymi zagadnienia pola elektromagnetycznego, umożliwiają przeprowadzenie podstawowych obliczeń umożliwiających wybór odpowiedniego modelu matematycz-

nego, do wykonania dalszych analiz. Na podstawie funkcji typu (7) możliwe jest określenie powierzchniowych rozkładów pola magnetycznego.

$$g(x, y) = \sum_i \sum_k \alpha_{i,k} \cos\left(\frac{2\pi}{a} ix\right) \cos\left(\frac{2\pi}{b} ky\right) \quad (7)$$

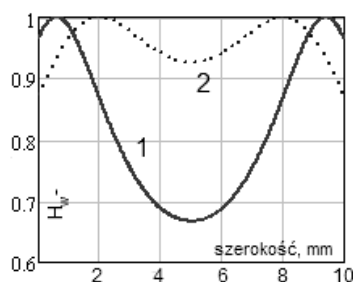
gdzie: a, b – funkcje związane z wymiarami układu grzejnego.

Dla uproszczonego układu 2D stanowiącego poprzeczny przekrój modelu, rozkład względnych wartości pola magnetycznego w funkcji średnicy podziałowej oraz odległości pomiędzy wzbudnikiem i wsadem, podano na rysunku 3 (a i b).



Rys. 3. Rozkłady względnych (odniesionych do maksymalnej) wartości natężenia pola magnetycznego, w funkcji średnicy podziałowej wzbudnika (a) oraz odległości układu wzbudnik – wsad (b). 1– D = 90 mm; gS = 5 mm; 2– D = 80 mm, gS = 5 mm; 3– D = 90 mm; gS = 10 mm

Zaprezentowane wyniki potwierdzają konieczność wykonywania wielowymiarowych obliczeń dla układów grzejnych z polem poprzecznym. Tym niemniej, odpowiednie ukształtowanie wzbudnika, wynikające z stosowania relatywnie niewielkich odległości pomiędzy zwojami, oraz zwiększanie odległości wzbudnik – wsad, umożliwiają ujednorodnienie rozkładu źródeł ciepła na nagrzewanej powierzchni. Do dalszych analiz przyjęto układ wzbudnik o średnicy podziałowej 80 mm, oddalony od wsadu o 10 mm. Rozkład natężenia pola magnetycznego w tym przypadku pokazano na rysunku 4.



Rys. 4. Rozkłady względnych (odniesionych do maksymalnej) wartości natężenia pola magnetycznego, w funkcji wymiarów układu wzbudnik – wsad. 1– D = 90 mm; gS = 5 mm; 2– D = 80 mm, gS = 10 mm

3. OBLICZENIA PROCESU NAGRZEWANIA INDUKCYJNEGO

Analizy związane z nagrzewaniem indukcyjnym wykonano przy wykorzystaniu metody bilansów elementarnych. Podstawowy bilans dla elementu znajdującego się wewnątrz rozpatrywanego obszaru (8), uwzględniał moc wydzielaną, przewodzoną oraz akumulacyjną. Na podstawie metody z krokiem w przód możliwe było bezpośrednio uwzględnienie zmienności parametrów materiałowych.

$$p_V \cdot V_E = \frac{t_{x-l,\tau} - t_{x,\tau}}{\Delta x} + \frac{t_{x,\tau} - t_{x+l,\tau}}{\Delta x} + \frac{V_E \cdot \rho_w \cdot c_p \cdot (t_{x,\tau+l} - t_{x,\tau})}{\Delta \tau} \quad (8)$$

$$\frac{F \cdot \lambda(t)}{F \cdot \lambda(t)}$$

gdzie: p_V – moc objętościowa, V_E – objętość elementu; F – powierzchnia; λ – przewodność cieplna właściwa; t – temperatura; x – krok przestrzeni; τ – krok czasu.

Moc grzejna (p_V) wyznaczana była na podstawie rozkładu analitycznego (9) oraz uśredniana dla całego elementu skończonego.

$$p_V = \frac{H_F^2}{\gamma \cdot \delta^2} \cdot \frac{\sinh\left(\frac{2 \cdot x}{\delta}\right) - \sin\left(\frac{2 \cdot x}{\delta}\right)}{\cosh\left(\frac{h}{\delta}\right) + \cos\left(\frac{h}{\delta}\right)} \quad (9)$$

W obliczeniach zastosowano obustronny warunek brzegowy trzeciego rodzaju, z uwzględnieniem radiacyjnego i konwekcyjnego oddawania ciepła z powierzchni nagrzewanej folii (10).

$$P_S = \alpha \cdot F_z \cdot (t_S - t_0) + \sigma_0 \cdot \varepsilon \cdot F_z \cdot (T_S^4 - T_0^4) \quad (10)$$

gdzie: α – współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję; F_z – powierzchnia oddająca ciepło; ε – emisyjność; t_S – temperatura powierzchni; t_0 – temperatura otoczenia.

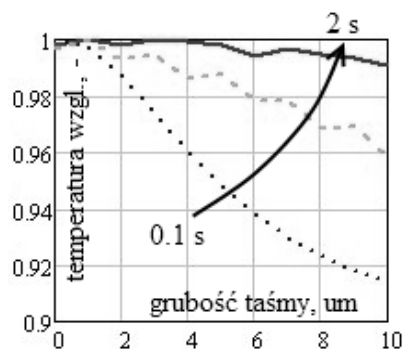
Analiza procesu nagrzewania wykonana została dla całkowitego czasu wynoszącego 2 s. Rozkłady temperatury w połowie szerokości taśmy dla zróżnicowanych czasów obliczeń pokazano na rysunku 5.

W początkowej fazie nagrzewania, temperatura na powierzchni rośnie najszybciej, stanowiąc obraz rozkładu źródeł ciepła. Tym niemniej, z uwagi na niewielki wymiar poprzeczny nagrzewanej folii, następuje jej szybkie ujednorodnienie w całym obszarze. Z niewielkim błędem możliwe jest przyjęcie izotermiczności nagrzewanego obiektu w całym okresie nagrzewania. Na rysunku 6 pokazano przebieg temperatury w czasie.

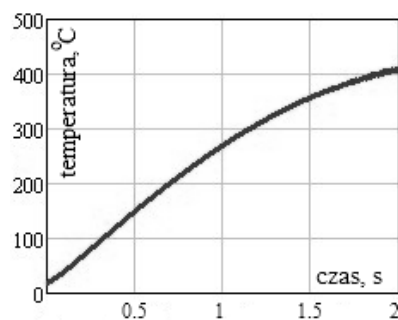
Przy analizowanej wartości mocy, temperatura umożliwiająca proces depolimeryzacji została osiągnięta w czasie 1,2 s. Dłuższy proces nagrzewania nie jest rozwiązaniem racjonalnym, z uwagi na niepotrzebne ograniczanie sprawności procesu. Sprawność, będąca podstawowym wyznacznikiem decydującym

o użyteczności proponowanego rozwiązania wyznaczona została na podstawie zależności (11) [4, 5]. Wartość ta uwzględnia zarówno część związaną z elektrycznym przetwarzaniem energii, jak i straty ciepła.

$$\eta_{et} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{m_2 \cdot c_{p2} \cdot (t_k - t_p)}{p_V \cdot V} \quad (11)$$



Rys. 5. Rozkłady temperatury względnej (odniesionej do maksymalnej) w funkcji grubości taśmy aluminiowej, przy różnych czasach nagrzewania



Rys. 6. Charakterystyka nagrzewania folii w urządzeniu do nagrzewania indukcyjnego

Wartości rezystancji wsadu (R_2) oraz wzbudnika (R_1), wyznaczono na podstawie zależności (12) oraz (13), obowiązujących dla układów płaskich do nagrzewania dwustronnego.

$$R_1 = \frac{2(A \cdot B) \cdot \rho_m}{\delta_l \cdot l_l \cdot k_w} \cdot F_r \quad (12)$$

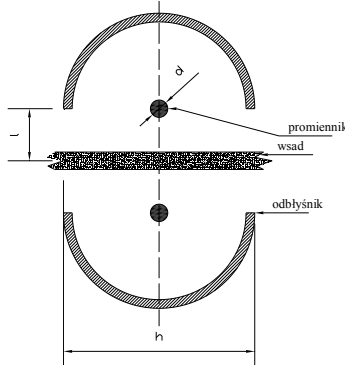
gdzie: A , B – długość oraz szerokość wzbudnika, F_r – współczynnik kształtu; k_w – współczynnik korekcyjny.

$$R_2 = \frac{l}{\gamma_2 \cdot \delta_2} \cdot \frac{\sinh\left(\frac{h}{\delta}\right) - \sin\left(\frac{h}{\delta}\right)}{\cosh\left(\frac{h}{\delta}\right) + \cos\left(\frac{h}{\delta}\right)} \quad (13)$$

Charakterystyka sprawności została podana w punkcie 5 artykułu, po dokonaniu porównania z inną techniką elektrotermiczną umożliwiającą pośrednie nagrzewanie folii aluminiowych: nagrzewaniem promiennikowym.

4. NAGRZEWANIE PROMIENNIKOWE MATERIAŁÓW CIENKOWARSTWOWYCH

Nagrzewanie promiennikowe folii aluminiowych nie jest, z uwagi na niską emisyjność aluminium, wykorzystywane. Tym niemniej, w procesie objętym tematyką niniejszego artykułu, gdzie aluminium pokryte jest warstwą polietylenu, wykorzystanie tej metody jest pożądane, z uwagi na potencjalnie wysokie teoretyczne sprawności. W niniejszej pracy wykorzystano model składający się z dwóch promienników zaopatrzonych w paraboliczne odbłyśniki, o wymiarach dostosowanych do nagrzewanej folii. Widok układu grzejnego pokazano na rysunku 7. Odległość pomiędzy promiennikami i nagrzewaną powierzchnią wynosiła 10 mm i była zgodna z odległością wzbudnika wykorzystywanego do analiz związanych z nagrzewaniem indukcyjnym. Dzięki zbliżonej geometrii modeli możliwe było dokonanie szybkiego porównania sprawności obu typów urządzeń elektrotermicznych, bez uwzględniania wpływu geometrii.



Rys. 7. Geometria układu do nagrzewania promiennikowego

Wartość mocy docierającej do nagrzewanej powierzchni określona jest za pomocą zależności (14), uzyskanej na podstawie podstawowych praw obowiązujących dla nagrzewania promiennikowego.

$$P_g = P_{p \rightarrow w} + P_{o \rightarrow w} = \sigma_0 \varphi_{p \rightarrow w}^* (T_p^4 - T_w^4) + \sigma_0 \varphi_{o \rightarrow w}^* (T_o^4 - T_w^4) \quad (14)$$

gdzie: P_{p-w} – moc emitowana z promiennika i docierająca do wsadu; P_{o-w} – moc emitowana z odbłyśnika i docierająca do wsadu; T_p – temperatura promiennika; T_o – temperatura odbłyśnika; T_w – temperatura wsadu; φ_{p-w}^* – zastępczy współczynnik konfiguracji promiennik – wsad; φ_{o-w}^* – zastępczy współczynnik konfiguracji odbłyśnik – wsad.

Zastępcze współczynniki konfiguracji wykorzystane w powyższej zależności obejmują parametry materiałowe i geometryczne. Współczynniki te wyznaczono dwuetapowo. W pierwszej kolejności wyznaczone zostały średnie współczynniki konfiguracji obejmujące parametry geometryczne. Wykorzystano zależności obejmujące zakres analizowanych geometrii oraz ich wzajemnych ustawień. Zależność (15), umożliwiającą obliczenie współczynników pomiędzy walcem i płaszczyzną, posłużyła do wyznaczenia współczynnika pomiędzy promiennikiem i wsadem. W celu obliczenia wartości współczynnika konfiguracji określającego wymianę ciepła pomiędzy odbłyśnikiem i wsadem, oraz wszystkich innych istotnych współczynników, wykorzystano zasady algebry Poliaka [4].

$$\varphi_{C-P} = \frac{l}{\pi} \arctg\left(\frac{h}{2l}\right) \quad (15)$$

gdzie: h – wymiar wsadu w kierunku normalnym do promieniowania; l – odległość pomiędzy promiennikiem i wsadem.

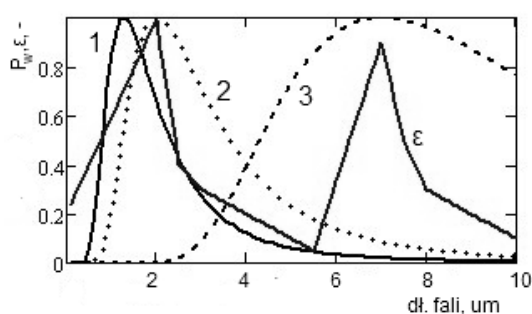
Zastępcze współczynniki konfiguracji wyznaczono przy wykorzystaniu zależności (16). Równanie w pełnej postaci było wykorzystane do obliczenia współczynników dla układu odbłyśnik – wsad. W przypadku układu promiennik – wsad, możliwe było zastosowanie uproszczeń wynikających z braku wklęsłych powierzchni. W tych warunkach własne współczynniki konfiguracji (φ_{1-1} oraz φ_{2-2}) nie występowały.

$$\varphi_{1-2}^* = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{1 - (1 - \varepsilon_1)\varphi_{1-1} - (1 - \varepsilon_2)\varphi_{2-2} + (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2)(\varphi_{1-1}\varphi_{1-2} - \varphi_{1-2}\varphi_{2-1})} \quad (16)$$

Do obliczeń wykorzystano, podobnie jak dla nagrzewania indukcyjnego, metodę bilansów elementarnych. Istotną różnicą w stosunku do modelu opisanego w poprzednim rozdziale było zastosowanie powierzchniowego źródła ciepła, o wydajności wynikającej z zależności (14). Wykorzystano wymuszenie w postaci stałej temperatury promiennika. Obliczenia wykonywano dwuetapowo. W pierwszym etapie wyznaczano temperaturę odbłyśnika. Na tej podstawie możliwe było określenie całkowitej mocy docierającej do wsadu i wykonanie analiz procesu nagrzewania.

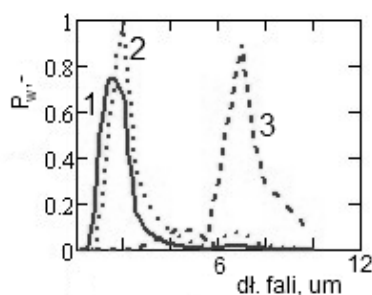
Wysoka sprawność procesu nagrzewania promiennikowego, oprócz warunków geometrycznych, determinowana jest również racjonalnym doбором źródła promieniowania do odbiornika. W przypadku rozpatrywanego źródła żarowego, istotnym parametrem jest temperatura promiennika, określająca widmowy roz-

kład promieniowania. Maksymalne wartości mocy powinny być emitowane na długościach fal odpowiadających maksymalnej emisyjności odbiornika promieniowania. W analizowanym przypadku wsadu złożonego z folii aluminiowej pokrytej warstwą polietylenu, o własnościach absorpcyjnych decyduje materiał zewnętrzny. Na rysunku 8 pokazano widmowe rozkłady emisyjności polietylenu [6] oraz względne (odniesione do wartości maksymalnej) widmowe rozkłady mocy emitowanych przez promienniki o temperaturach z zakresu 1100 – 2000°C.



Rys. 8. Widmowe rozkłady emisyjności polietylenu (ϵ) oraz względnych mocy emitowanych przez promienniki o różnych temperaturach: 1– 2000°C, 2– 1500°C, 3– 1100°C

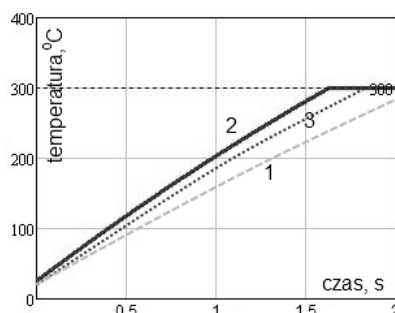
Rozkłady widmowe promieniowania pochłanianego przez wsad dla analizowanych przypadków pokazano na rysunku 9. Na podstawie analiz określono potencjalne sprawności układu promiennik – wsad. Znacznie wydajniejsze jest wykorzystanie promienników o optymalnie dobranych temperaturach. Do dalszych analiz wybrano promiennik o temperaturze 1500°C, charakteryzujący się najwyższym wskaźnikiem sprawności.



Rys. 9. Moce emitowane przez promienniki o różnych temperaturach i pochłaniane przez polietylen. 1– 2000°C, 2– 1500°C, 3– 1100°C

Charakterystyki nagrzewania pokazano na rysunku 10. Czas trwania procesu nagrzewania ustalono na 2 sekundy. Dodatkowo założono, że w temperaturze

300°C następuje odparowanie polietylenu. Efekt ten widoczny jest w końcowej fazie procesu grzejnego, w której następuje bardzo intensywne ograniczenie tempa nagrzewania, wynikające z występowania na powierzchni czystego aluminium o niskiej emisyjności. Charakterystyki nagrzewania uzyskano przy symulacji układu współpracującego z promiennikami o różnych temperaturach, zgodnie z oznaczeniami pokazanymi na rysunku 8.



Rys. 10. Charakterystyki nagrzewania w układzie z promiennikami o zróżnicowanych temperaturach: 1– 2000°C, 2– 1500°C, 3– 1100°C

5. PODSUMOWANIE

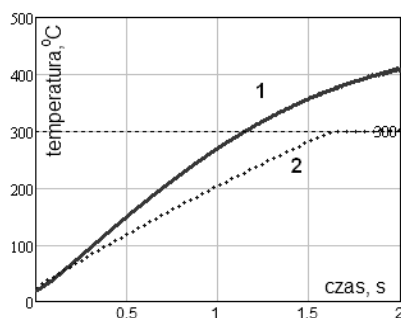
W niniejszej publikacji analizie poddano możliwość konstrukcji urządzenia do depolimeryzacji kompozytowych materiałów typu TETRA-PAK. Urządzenie oraz technologia wpisują się w aktualne trendy dotyczące proekologicznych rozwiązań umożliwiających odzysk surowców wtórnych.

Analizie poddano dwa typy urządzeń elektrotermicznych o cechach, które potencjalnie czynią je najbardziej odpowiednimi do realizacji tej technologii. Prace symulacyjne wykonano w pierwszej kolejności dla nagrzewania indukcyjnego. Na podstawie obliczeń dokonano doboru racjonalnej geometrii układu wzbudnik – wsad oraz parametrów układu zasilającego wzbudnik. Podczas symulacji nagrzewania promiennikowego wykonano kompletne obliczenia z wykorzystaniem geometrii zbliżonej do nagrzewnicy indukcyjnej. Na rysunku 11 pokazano porównanie charakterystyk nagrzewania uzyskane przy wykorzystaniu tych dwóch metod.

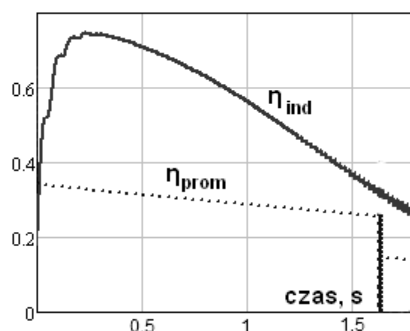
Przy tej samej mocy dostarczanej do źródła (wzbudnika oraz promiennika), wsad nagrzewany jest znacznie szybciej w nagrzewnicy indukcyjnej. Fakt ten świadczy o wyższej sprawności tego rozwiązania. Na rysunku 12 pokazano wartości sprawności analizowanych urządzeń w czasie nagrzewania.

Przebieg sprawności w układzie promiennikowym jest typowy. Z uwagi na rosnące straty ciepła, sprawność obniża się w czasie nagrzewania. Dla układu z nagrzewaniem indukcyjnym, wartość sprawności wzrasta w początkowym

okresie z uwagi na wzrost rezystywności aluminium. Tym niemniej, znaczne zwiększanie radiacyjnych strat ciepła powoduje zmniejszanie sprawności w czasie nagrzewania.



Rys. 11. Charakterystyki nagrzewania folii aluminiowej przy wykorzystaniu metody indukcyjnej (1) i promiennikowej (2)



Rys. 12. Charakterystyki sprawności w funkcji czasu nagrzewania

Całkowita sprawność elektrotermiczna dla układu z nagrzewaniem indukcyjnym wynosiła 64 %, podczas gdy dla układu promiennikowego: 40,1 %. Wyniki te jednoznacznie świadczą o większej zasadności konstrukcji urządzenia wykorzystującego nagrzewanie indukcyjne. Rozwiązanie takie powinno w praktyce umożliwić znaczną poprawę sprawności poprzez racjonalną konstrukcję układu wzbudnik – wsad, umożliwiającą ograniczenie radiacyjnych strat ciepła, oraz sterowanie układu w sposób gwarantujący pracę w optymalnym punkcie.

LITERATURA

- [1] Hering M.: Podstawy Elektrotermi t.2, Warszawa, WNT, 1993.
- [2] Lupi S., Forzan M., Aliferov A.: Induction and Direct Resistance Heating, Springer 2015, ISBN 978-3-319-03479-9.

-
- [3] Barglik J.: Induction Heating of Thin Strips in Transverse Flux Magnetic Field, *Advances in Induction and Microwave Heating of Mineral and Organic Materials* (2011).
 - [4] Wesołowski M.: Model Nagrzewnicy Indukcyjnej z Mikroprocesorowym Sterownikiem Mocy, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 10/2013.
 - [5] Matweb.com (dostęp 01.07.2015).

EFFICIENCY OF DIRECT AND INDIRECT HEATING OF THIN ALUMINUM FOILS

Heating processes of thin layers (for example foils), according to large external surfaces, is usually characterized by low efficiencies. Despite of this statement, utility of such techniques increases nowadays in many technologies. In the article we analyze the possibility of induction and infrared heating utility of thin aluminum foil, used in TETRA PAK cardboard packages. Mathematical models of induction and infrared heaters were presented and simulation results, basing on authors algorithms were discussed. Basing on results, the electrothermal efficiencies of analyzed processes were determined.

(Received: 15. 02. 2017, revised: 28. 02. 2017)