

Nehad AL.-KHALIDY

Janusz SKOREK

Politechnika Śląska, Gliwice

IDENTYFIKACJA ROZKŁADU TEMPERATURY PODCZAS SPAWANIA ZA POMOCĄ METODY FILTRACJI DYNAMICZNEJ

Streszczenie. Praca dotyczy identyfikacji pola temperatury w materiale poddawany spawaniu wiązką plazmy lub lasera. Do rozwiązania zadania odwrotnego wykorzystano metodę optymalnej filtracji dynamicznej (filtr Kalmana) w połączeniu z metodą bilansów elementarnych. Podstawowym celem była tu identyfikacja pola temperatury w obszarze ciała stałego. Podejście to umożliwia uwzględnienie zmian własności termofizycznych materiału wraz z temperaturą oraz pozwala uwzględnić wpływ wielkości błędów pomiarów.

W celu przetestowania dokładności zastosowanych metod analizowano wpływ następujących parametrów technologicznych i obliczeniowych: właściwości termofizycznych materiału, liczby i położenia punktów pomiarowych i wielkości błędów pomiaru. Dokładność obliczeń określano przez porównanie uzyskanych wyników z wynikami analogicznego zagadnienia bezpośredniego.

IDENTIFICATION OF TEMPERATURE PROFILE DURING WELDING APPLYING STOCHASTIC APPROACH

Summary. A Kalman filter method in conjunction with the nonuniform control volume methodology is adopted as a numerical tool for solving two-dimensional inverse heat conduction problems for a moving body. This work focuses on estimation of the transient temperature in the solid region of the workpiece during welding process that involves a moving heat source. Influence of several parameters as thermal properties of material, location of measurement points and measurement errors on the accuracy of calculations were examined.

1. WSTĘP

Odwrotne zagadnienia przepływu ciepła to takie problemy, w których nie są znane wszystkie przyczyny wywołujące dane zjawisko (np. warunki brzegowe), są natomiast znane niektóre skutki wywołane tymi przyczynami (np. wartości temperatury w niektórych punktach ciała). Do rozwiązywania zagadnień odwrotnych stosuje się obecnie wiele różnych metod [1]. Ważną grupę zagadnień odwrotnych stanowią problemy identyfikacji. Jedną z najbardziej efektywnych metod rozwiązywania problemów identyfikacji jest metoda filtracji dynamicznej, zwana metodą filtru Kalmana. Metoda ta znalazła zastosowanie do rozwiązywania wielu problemów technicznych [2-5].

Zasadniczym celem przedstawionej pracy jest opracowanie modeli matematycznych i algorytmów obliczeniowych rozwiązania liniowego i nieliniowego zagadnienia odwrotnego dla procesów ze zmianą fazy (ciecz – ciało stałe) oraz z ruchomym źródłem ciepła w celu identyfikacji pola temperatury podczas plazmowego i laserowego spawania metali. W celu przetestowania dokładności rozwiązania oraz w celu symulacji danych pomiarowych dla rozwiązania zagadnienia bezpośredniego [6].

2. ZAŁOŻENIA MODELU MATEMATYCZNEGO

Przedstawiono podstawowe założenia i sformułowanie modelu matematycznego procesu spawania za pomocą łuku plazmowego. Wiązka plazmy lub wiązka laserowa o odpowiedniej mocy jest kierowana na połączenie dwóch części spawanego materiału. W modelu przyjęto, że układ współrzędnych (x, y) porusza się wraz ze źródłem energii (ciepła), tzn. wraz z wiązką plazmy (rys. 1). Zakłada się, że energia promieniowania wiązki jest całkowicie absorbowana przez materiał w tzw. „oczku” (w technologii spawalniczej używa się również określenia „dziurka do klucza” – ang. Keyhole). Ponadto przyjmuje się (zgodnie z danymi eksperymentalnymi) kołowy kształt oczka.

Równania energii dla dwuwymiarowego obszaru ze zmianą fazy \mathbf{R} sformułowano oddzielnie dla obszaru fazy ciekłej \mathbf{R}_l i fazy stałej \mathbf{R}_s . Obydwa obszary są oddzielone powierzchnią rozdziału faz \mathfrak{R} . Równania nieustalonego pola temperatury mają następującą postać:

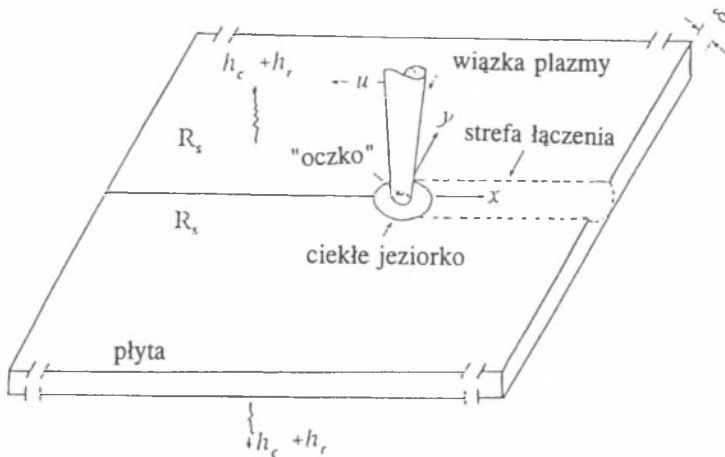
dla fazy stałej

$$\rho_s C_s(T) \frac{\partial T_s(x, y, t)}{\partial t} + \rho C_s(T) u \frac{\partial T_s(x, y, t)}{\partial x_{(x, y) \in R_s}} = \nabla \lambda_s(T) \nabla T_s(x, y, t) - \frac{h(T)}{\delta} T(x, y, t) \quad (1)$$

oraz dla fazy ciekłej

$$\rho_l C_l \frac{\partial T_l(x, y, t)}{\partial t} + \rho_l C_l u \frac{\partial T_l(x, y, t)}{\partial x} = \nabla \lambda_l \nabla T_l(x, y, t) - \frac{h(T)}{\delta} T(x, y, t) \quad (x, y) \in R, \quad (2)$$

gdzie: ρ - gęstość, c - ciepło właściwe, u - prędkość spawania, T - temperatura liczona względem temperatury otoczenia, λ - przewodność cieplna, h - współczynnik wnikania ciepła, δ - grubość płyty, t - czas. Indeksy s i l odnoszą się do fazy stałej i ciekłej. W równaniu dla fazy ciekłej pominięto człon związany z konwekcją.



Rys. 1. Spawanie płyt metalowych łukiem plazmowym
Fig. 1. Welding of the steel plates using plasma arc

Współczynnik wnikania ciepła na górnej i dolnej powierzchni płyty wynika z zależności:

$$h(T) = h_c + h_r \quad (3)$$

Zastosowanie techniki odwrotnej pozwala pominąć w rozważaniach wymienione ciepła w obszarze fazy ciekłej. Stąd równanie (2) wprowadzono do modelu bezpośredniego tylko w celu symulacji danych wejściowych do testowania modelu zagadnienia odwrotnego. Wyniki rozwiązania zagadnienia bezpośredniego przedstawiono w pracy [6].

W modelu przyjęto następujący warunek brzegowy na granicy fazy ciekłej i oczka

$$T = T_b - T_\infty \quad \text{at } r_{\text{arc}} = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad (4)$$

gdzie T_b oznacza temperaturę parowania materiału a r_{arc} jest promieniem oczka.

Warunek symetrii względem osi x ma postać:

$$\frac{\partial T_l}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial T_s}{\partial y} = 0 \quad \text{dla } y = 0 \quad (5)$$

Na krawędziach płyty metalu przyjęto warunki brzegowe drugiego rodzaju (powierzchnie adiabatyczne)

$$\frac{\partial T_s}{\partial x} = 0 \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

Do dyskretyzacji problemu zastosowano metodę bilansów elementarnych [7]. Ważną zaletą tej metody jest to, że całkowite równania zachowania energii są spełnione automatycznie zarówno w obrębie elementu różnicowego, jak i w całym obszarze. W celu uniknięcia oscylacji rozwiązania (ze względu na obecność członu konwekcyjnego w równaniu energii) zastosowano tzw. technikę *pod wiatr*.

Jak już wspomniano, rozwiązanie zagadnienia bezpośredniego T_{ex} stanowiło podstawę do symulacji wyników pomiarów T_{mea} , wykorzystywanych następnie do rozwiązania zagadnienia odwrotnego:

$$T(x_m, y_m, t_k) = T_{\text{ex}}(m) \quad m = 1, 2, \dots, M, \quad (7)$$

gdzie M oznacza całkowitą liczbę punktów pomiarowych, a k jest numerem kroku czasu.

Do rozwiązania zagadnienia nie jest potrzebny warunek początkowy, co jest zaletą metody filtru Kalmana.

3. ROZWIĄZANIE ZAGADNIENIA ODWROTNEGO Z WYKORZYSTANIEM METODY OPTYMALNEJ FILTRACJI DYNAMICZNEJ

Przedstawiono zastosowanie metody optymalnej filtracji dynamicznej do identyfikacji nieustalonego pola temperatury w obszarze stałym spawanego materiału. Przyjęto, że właściwości materiału są stałe lub są funkcjami temperatury. Do identyfikacji wykorzystuje się wyniki pomiarów temperatury w punktach usytuowanych w obszarze fazy stałej. Wyniki pomiarów są symulowane poprzez rozwiązanie zagadnienia bezpośredniego [6]. Analiza odwrotna dotyczy identyfikacji temperatury wewnątrz i na brzegu rozpatrywanego obszaru.

W metodzie filtru Kalmana estymacji (rekursywnej) podlegają zarówno wartości identyfikowanych wielkości, jak i ich wariancje. Jest to ważna cecha metody, umożliwiająca ocenę wiarygodności uzyskanych rezultatów. Metoda składa się z dwóch etapów:

- predykcji, tzn. oceny pola temperatury na bazie modelu matematycznego,
- filtracji, tzn. korekcji rezultatów na podstawie wyników pomiarów.

W celu zastosowania metody filtracji model zjawiska powinien być zapisany w standardowej postaci tzw. równania stanu (w ogólności nieliniowego):

$$\mathbf{T}_{k+1} = \mathbf{F}_{k+1}(\mathbf{T}_k) \quad (8)$$

Temperatury węzłowe (zgrupowane w wektorze stanu \mathbf{T}) są traktowane jak wielkości stochastyczne. Zakłada się, że relacja pomiędzy wielkościami \mathbf{Z}_{k+1} zmierzonymi w chwili czasu $k+1$ a temperaturami węzłowymi \mathbf{T}_{k+1} ma następującą postać (tzw. równanie wyjść):

$$\mathbf{Z}_{k+1} = \mathbf{H} \mathbf{T}_{k+1} + \mathbf{v}_{k+1}, \quad (9)$$

gdzie \mathbf{H} jest macierzą wyrażającą relacje pomiędzy wielkościami mierzonymi a identyfikowanymi, a \mathbf{v}_{k+1} oznacza wektor błędów pomiarowych (o zerowej wartości średniej i o macierzy kowariancji \mathbf{V}).

W skrócie algorytm metody przedstawia się następująco:

- Szacuje się wartości temperatury w węzłach $\tilde{T}_{k+1,k}$ w chwili czasu $k+1$ na podstawie oszacowania temperatury \tilde{T}_k i macierzy kowariancji \mathbf{W}_k w poprzednim kroku czasu k . Do tego celu wykorzystuje się równanie stanu (8) oraz prawo propagacji błędów.
- W chwili czasu $k+1$ dokonuje się pomiarów temperatury w wybranych punktach obszaru.
- Oszacowanie w pierwszym kroku koryguje się na podstawie równania filtru:

$$\tilde{T}_{k+1} = \tilde{T}_{k+1,k} + \mathbf{K}_{k+1} [\mathbf{z}_{k+1} - \mathbf{H}\tilde{T}_{k+1,k}], \quad (10)$$

gdzie macierz \mathbf{K}_{k+1} oznacza tzw. macierz wzmocnienia filtru.

$$\mathbf{K}_{k+1} = \mathbf{W}_{k+1} \mathbf{H}^T \mathbf{V}_{k+1}^{-1}, \quad (11)$$

gdzie indeks T oznacza transpozycję macierzy.

Macierz kowariancji a posteriori wyników estymacji \mathbf{W}_{k+1} ma następującą postać:

$$\mathbf{W}_{k+1} = \mathbf{W}_{k+1,k} - \mathbf{W}_{k+1,k} \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{W}_{k+1,k} \mathbf{H}^T + \mathbf{V}_{k+1})^{-1} \mathbf{H} \mathbf{W}_{k+1,k} \quad (12)$$

Dla zagadnienia nieliniowego zastosowano procedurę iteracyjną do korygowania zależnych od temperatury właściwości termofizycznych materiału.

4. WYNIKI OBLICZEŃ

Zaproponowana metoda została zastosowana do identyfikacji pola temperatury wewnątrz i na brzegu spawanej płyty. Rozpatrzono problem dwuwymiarowego przewodzenia ciepła. Właściwości termofizyczne są funkcjami temperatury (zagadnienie nieliniowe). Prędkość źródła przyjęto równą 1 mm/s. Wyniki pomiarów symulowano wykorzystując rozwiązanie zagadnienia bezpośredniego T_{ex} . Wartość tę zaburzano następnie losowym błędem zgodnie z zależnością:

$$T_{cr}(i, k) = T_{mca}(i, k) + (1 - 2\tau) w, \quad (13)$$

gdzie w oznacza maksymalną wartość błędu, a τ oznacza liczbę losową z przedziału $[0, 1]$.

Przyjęto następujące podstawowe dane do obliczeń:

$N = 20 \times 15 = 300$ elementów różnicowych,

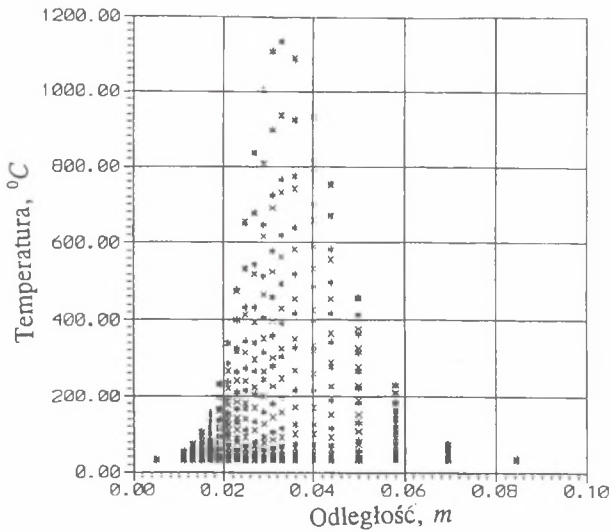
$m = 11$,

$\lambda = 14,42 + 0,0169 \cdot T - 2,44E-06 \cdot T^2$,

$c = 484,6 + 0,159 \cdot T + 18,07E-06 \cdot T^2$.

$\Delta t = 0,08$ s.

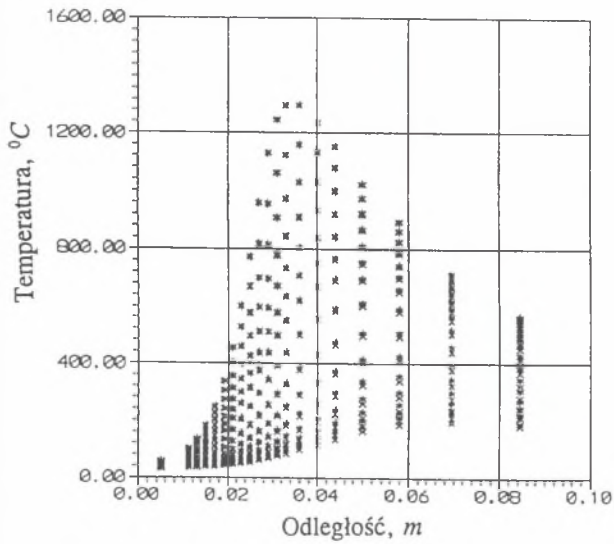
Przyjęto, że punkty pomiarowe są usytuowane na linii o współrzędnej $y = 8$ mm.



Rys. 2. Rozkład temperatury wzdłuż osi x ($u = 1$ mm/s, $\tau = 12$ s, błąd pomiaru = 0)

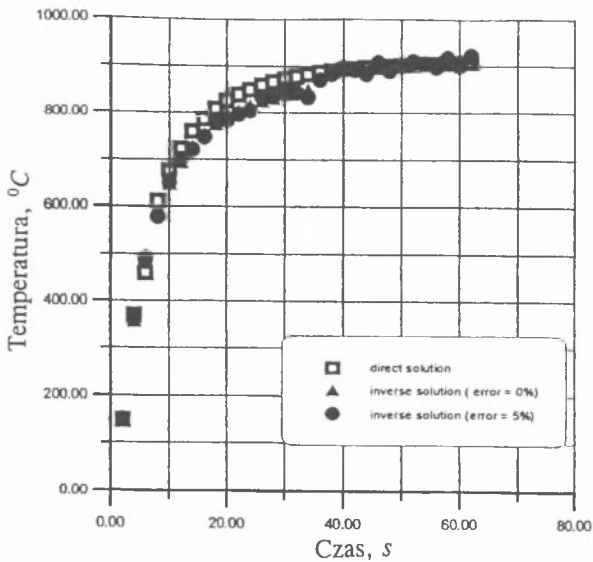
Fig. 2. Temperature distribution along x ($u = 1$ mm/s, $\tau = 12$ s, measurement error = 0)

Wyniki identyfikacji pola temperatury przedstawiono na rysunkach od 2 do 5. Pole temperatury wzdłuż osi x dla przypadku braku błędów pomiarowych przedstawiono na rys. 2 i rys. 3. Widoczna jest bardzo dobra zgodność z rozwiązaniem dokładnym. Jest ona szczególnie wysoka w obszarze, gdzie występują wysokie gradienty temperatury. Dokładność z mniejszą się w obszarach o względnie małych gradientach temperatury. Widoczne jest, że stan pseudoustalony osiągany jest najszybciej w pobliżu działania źródła (wiązki plazmy). Po osiągnięciu pseudoustalonego rozkładu temperatury w materiale dokładność identyfikacji staje się bardzo wysoka (rys.3).



Rys. 3. Rozkład temperatury wzdłuż osi x ($u = 1 \text{ mm/s}$, $\tau = 60 \text{ s}$, błąd pomiaru = 0)

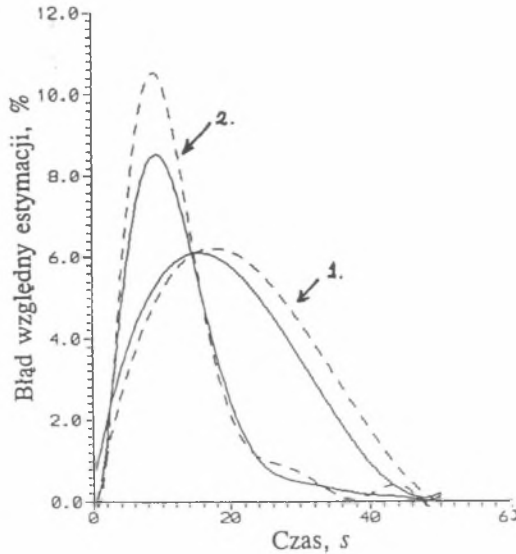
Fig. 3. Temperature distribution along x axis ($u = 1 \text{ mm/s}$, $\tau = 60 \text{ s}$, measurement error = 0)



Rys. 4. Przebieg temperatury w węzle nr 52 ($i = 3$, $j = 12$)

Fig. 4. Temperature distribution at the node 52 ($i = 3$, $j = 12$)

Analizowano również wpływ błędów pomiarów na dokładność estymacji temperatury. Na rys. 4 przedstawiono wyniki obliczeń dla błędu względnego, wynoszącego 5%. Dokładność estymacji jest ciągle bardzo dobra (szczególnie po osiągnięciu stanu ustalonego). Błąd względny identyfikacji temperatury $(T_{ex} - T_{inv})/T_{ex}$ w funkcji czasu dla wybranych węzłów oraz dla różnych wartości błędu pomiaru przedstawiono na rys. 4. Błąd pomiarów przyjęto 0% (linia ciągła) oraz 5% (linia przerywana).



Rys. 5. Względny błąd estymacji temperatury w płycie (1 – $x = 0,031$ m, $y = 0,0125$ m; 2 – $x = 0,05$ m, $y = 0,00875$ m)

Fig. 5. Relative error of temperature estimation in the plate (1 – $x = 0,031$ m, $y = 0,0125$ m, 2 – $x = 0,05$ m, $y = 0,00875$ m)

5. UWAGI KOŃCOWE I WNIOSKI

1. Zastosowanie techniki odwrotnej jest korzystnym narzędziem analizowania procesów spawania, gdyż umożliwia opis bardzo złożonych procesów cieplnych bez konieczności rozpatrywania trudnych do opisu matematycznego procesów zachodzących w obszarze fazy ciekłej.

2. Analizowano wpływ szeregu parametrów (liczba punktów pomiarowych, położenie punktów pomiarowych, prędkość spawania, moc wiązki plazmowej, dokładność pomiarów) na rozkład temperatury w materiale i dokładność obliczeń. Uzyskano zadowalające rezultaty, szczególnie w przypadku, gdy punkty pomiarowe są położone stosunkowo blisko granicy faz.
3. Opracowany model, oparty na metodzie optymalnej filtracji dynamicznej (filtr Kalmana), umożliwia identyfikację dwuwymiarowego nieustalonego pola temperatury w spawanym materiale. Dokładność modelu była zweryfikowana za pomocą eksperymentów numerycznych. Dokładność rozwiązania zależy w głównej mierze od następujących parametrów: liczby i rozmieszczenia punktów pomiarowych, błędu pomiaru, prędkości spawania, właściwości termofizycznych materiału oraz rozmiarów elementów różnicowych i kroku czasu.
4. Testy numeryczne potwierdziły przydatność modelu filtracji dynamicznej do analizy problemu spawania plazmowego. Model może być również wykorzystany do analizy innych problemów ze zmianą fazy. Możliwa wydaje się także modyfikacja modelu w celu identyfikacji położenia granicy faz.

LITERATURA

1. Beck J. Blackwell B. and Clair St. C.R., Inverse Heat Conduction- III Posed problems: Wiley-Interscience, New York, 1985.
2. Norton J.: An introduction to Identification, Academic Press: London, 1986.
3. Murakami A. and Hasegawa T., Application of Kalman filtering to inverse problems: Theoretical and Applied Mechanics, 1993, 42, pp. 3-14.
4. Murakami A. and Hamaguchi T., Identification of parameters of groundwater flow model by using extended Kalman filter-FE: Proceeding of the 2nd International Symposium on Inverse Problem-ISIP, Paris/France, 1994.
5. Al-Khalidy N. and Skorek J., Optymal Dynamic Filtration Approach for Inverse Heat Conduction Problems with Moving Body: Inverse Problems in Engineering, 1997, 4, pp. 209-229, USA.

6. Al.-Khalidy N., Enthalpy technique for solution of Stefan problems: Application to the keyhole plasma arc welding process involving moving heat source: Int. Comm. Heat Mass transfer, 1995, 22, pp. 779-790.
7. Patankar S., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere, Washington, 1980.

Recenzent: Prof.dr hab. Roman Domański

Wpłynęło do Redakcji 03.09.1998 r.

Abstract

The inverse problem with is considered herein deals with estimation of the transient temperature in the solid region of a workpiece during the welding process based on the transient temperature measurements at a number of thermocouples located in the solid region. The fusion zone not analyzed. The problem belongs to the class of boundary inverse heat conduction problems. In practice, such a problem is of great interest when only the measurement of the temperatures at a number of sensors enables us to identify the temperature fields within the calculation domain. In such a case heat transfer and fluid flow equations in the fusion zone need not be considered. In this study the temperature data are simulated basing on the solution of the direct problem. The solution of the inverse problem is based on the theory of the optimal dynamic filtration method. Basing on the numerical results the following conclusions are summarized.

1. The optimal dynamic filtration method gives very good and stable results of calculation (The accuracy of the numerical solution for inverse problem is verified by comparing the results with the reference direct solution).
2. The presented method permits treatment of a temperature dependent thermal properties of materials and disturbances in the measurement data.
3. One of the advantages of the algorithm is that the initial temperature can be unknown (the initial inverse problem is of significant interest in many engineering application).
4. The results can be very important for determination the solid structure during welding and heat treatment process.