

Jan Turant
Politechnika Łódzka
Katedra Mechaniki i Informatyki Technicznej
email: jan.turant@p.lodz.pl

STEROWANIE ROZPŁYWEM CIEPŁA W WALE KALANDRA Z WYKORZYSTANIEM MATERIAŁÓW GRADIENTOWYCH

Streszczenie – W pracy analizowano rozptyw ciepła w wale kalandra, którego elementy konstrukcyjne mogą być wykonane z materiałów gradientowych. Podstawowym problemem eksploatacyjnym kalandrów jest nierównomierność rozkładu temperatur wzdłuż powierzchni roboczej kalandra. Równomierność rozkładu temperatur może być regulowana poprzez wprowadzenie między elementami grzewczymi wału a jego powierzchnią roboczą warstwy materiału o zmiennym, odpowiednio dobranym, współczynniku przewodzenia ciepła. W ramach pracy przeprowadzono optymalizację współczynnika przewodzenia ciepła w tej warstwie zakładając, że warstwa ta zbudowana jest z mieszaniny dwóch materiałów o wyraźnie różnych własnościach przewodzenia ciepła. Na etapie optymalizacji wykorzystano hybrydowy algorytm zbudowany z szeregowo połączonego zmiennoprzecinkowego algorytmu ewolucyjnego i algorytmu Hooke’a-Jeevesa. Analiza zachowania się konstrukcji była przeprowadzana metodą elementów skończonych.

Słowa kluczowe: projektowanie kalandrów, sterowanie przepływem ciepła, algorytmy hybrydowe, materiały gradientowe

1 Wstęp

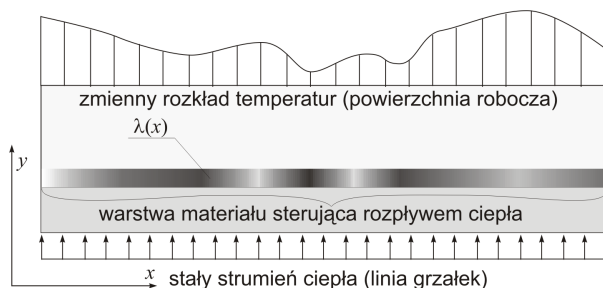
Kalandry są szeroko wykorzystywanymi urządzeniami do wygładzania materiałów wykonanych z surowców naturalnych jak i do zgrzewania materiałów syntetycznych. W zastosowaniach, w których następuje zgrzewanie materiałów istotna jest równomierność nagrzania powierzchni roboczej wałów kalandra. Na przykład dla włóknin wykonanych z materiałów polimerowych, poddanych procesowi spajania przez zgrzewanie, temperatura pracy wałów kalandra powinna wynosić około 300 °C przy jednoczesnym jej utrzymaniu w zakresie $\pm 2^{\circ}\text{C}$. Utrzymanie takiej temperatury może być kłopotliwe ze względu na dodatkową wymianę ciepła na częściach czołowych wału kalandra.

Praca ta jest kontynuacją prac [1,2], w których autor zajmował się optymalnym projektowaniem rozkładu źródeł ciepła w celu wyrównania

temperatury powierzchni roboczej wału kalandra. Praca jest bezpośrednią kontynuacją badań przedstawionych w [3], gdzie do sterowania rozptywem ciepła wykorzystywana była warstwa zbudowana z różnych materiałów o jednolitych własnościach cieplnych. Podstawowym, postawionym tam problemem, było jak, i jakie materiały rozmieścić w warstwie sterującej przepływem ciepła, aby zapewnić równomierne grzanie powierzchni roboczej wału kalandra.

Sterowanie rozkładem temperatur w elementach konstrukcyjnych jest istotnym aspektem projektowania rozwiązań mechanicznych. Sterowanie takie można osiągnąć poprzez sterowanie warunkami brzegowymi, własnościami materiałów, z których zbudowano konstrukcje czy ich rozłożeniem.

W niniejszej pracy zaproponowano podobne rozwiązanie konstrukcyjne jak w [3] pozwalające sterować rozptywem ciepła poprzez warstwę materiału o odpowiednio zaprojektowanych własnościach cieplnych. Koncepcja konstrukcyjna zakłada istnienie między linią grzałek a powierzchnią roboczą warstwy gradientowego materiału o zmiennym współczynniku przewodzenia ciepła. Odpowiednia zmienność współczynnika przewodzenia ciepła w warstwie sterującej umożliwia projektowanie rozkładu temperatur na wybranych powierzchniach (rys. 1).



Rys. 1. Sterowanie rozkładem temperatur poprzez zmienny współczynnik przewodzenia ciepła warstwy sterującej

Materiały gradientowe stanowią jeden z wiodących kierunków rozwoju współczesnej inżynierii materiałowej. Najczęściej są to materiały dwuskładnikowe, w których oba składniki mogą być mieszane w różnych proporcjach (0 - 100%) w różnych obszarach materiału. Technologii otrzymywania takich materiałów jest wiele i wciąż prowadzone są badania nad ulepszeniem już istniejących technologii czy wprowadzeniem nowych [4]. Wśród technologii otrzymywania materiałów gradientowych można wyliczyć technologie proszkowe i metody osadzania istniejące w bardzo wielu różnorodnych odmianach. Zmienne własności cieplne takich materiałów wykorzystywane są np. w celu zmniejszenia naprężeń termicznych w konstrukcjach zbudowanych z materiałów ceramicznych i

metalowych gdy to materiał ceramiczny przechodzi w metal wraz ze zwiększaniem udziału frakcji metalu. Problem relaksacji naprężeń dyskutowany jest między innymi w [5,6,7,8].

W pracy tej skoncentrowano się nad zaprojektowaniem, odpowiedniego dla wyrównania temperatur powierzchni roboczej wału kalandra, rozkładu współczynników przewodzenia ciepła w warstwie sterującej przepływem ciepła zbudowanej z materiału gradientowego.

Analizę pól termicznych wału przeprowadzono wykorzystując metodę elementów skończonych. Etap syntezy procesu optymalizacyjnego, w wyniku którego poszukiwano wymiarów poszczególnych elementów konstrukcji sterujących przepływem ciepła, przeprowadzono wykorzystując algorytm hybrydowy zbudowany z szeregowo połączonych zmiennoprzecinkowego algorytmu ewolucyjnego i algorytmu Hooke'a-Jeewesa.

2 Sformułowanie problemu

Ze względu na kołową symetrię wału kalandra rozważmy przekrój wzdłużny walca kalandra wykonanego z izotropowych materiałów płaszcza, warstwy sterującej rozplywem ciepła i rdzenia (rys. 2). Założono, że zewnętrzna powierzchnia walca opływana jest przez czynnik chłodzący (np. powietrze). Ze względu na symetrię pokazanego przekroju rozpatrzono jedynie część czwartą przekroju izolując termicznie krawędzie powstałe w skutek podziału wzdłuż osi symetrii (rys. 3).

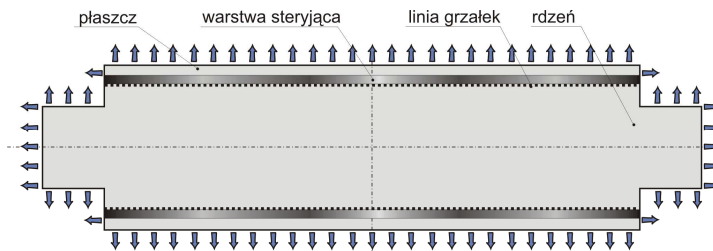
Zachowanie się takiej konstrukcji w ustalonym stanie przewodzenia ciepła jest opisane typowymi równaniami w postaci:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{div} \mathbf{q} + \mathbf{f} &= 0 \\ \mathbf{q} &= -\lambda_i \nabla T \end{aligned} \right\} \quad \text{w } \Omega_p, \Omega_r, \Omega_s \quad (1)$$

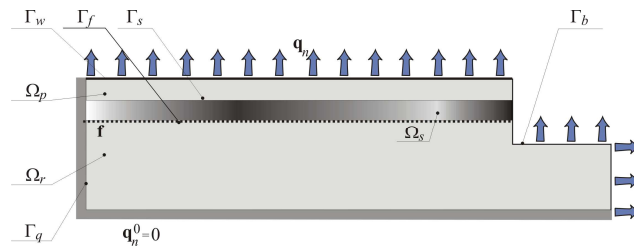
gdzie \mathbf{q} oznacza strumień ciepła, λ_i jest współczynnikiem konwekcji odpowiedniego obszaru, ∇T jest gradientem pola temperatur a \mathbf{f} oznacza intensywność źródeł ciepła - różnych od zera tylko w obszarze Ω_r . Równania (1) muszą być uzupełnione odpowiednimi warunkami brzegowymi zgodnie ze schematem obciążenia zaprezentowanym na rys. 3 oraz warunkami ciągłości wzdłuż brzegów wewnętrznych. W rozważanym przypadku przyjmą one postać:

$$\begin{aligned}
 q_n &= \mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = q_n^0 && \text{na } \Gamma_q \\
 q_n &= h(T - T_\infty) && \text{na } \Gamma_w, \Gamma_b \\
 \Delta T &= 0 && \text{na } \Gamma_f, \Gamma_s
 \end{aligned} \tag{2}$$

gdzie q_n^0 jest gęstością strumienia ciepłego, T_∞ oznacza temperaturę otoczenia, h jest współczynnikiem konwekcji ciepła do otoczenia, \mathbf{n} jest wektorem normalnym do brzegu Γ_q a ΔT jest skokiem temperatur na granicy komponentów wału.



Rys. 2. Obciążenie cieplne przekroju wzdłużnego wału kalandra

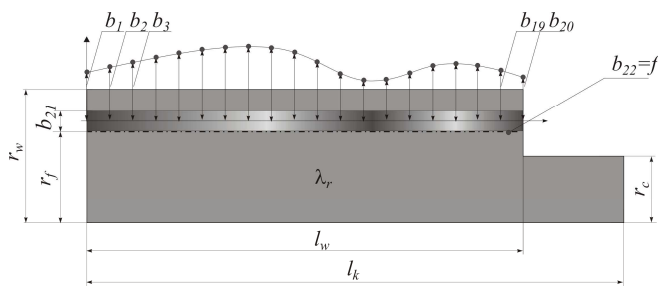


Rys. 3. Warunki brzegowe dla jednej czwartej przekroju wzdłużnego wału kalandra

3 Problem optymalizacyjny

Ze względu na specyfikę zaproponowanego rozwiązania problem optymalizacyjny sprowadza się do znalezienia takiego rozkładu współczynników przewodzenia ciepła w warstwie sterującej, która spowoduje wyrównanie temperatur powierzchni roboczej do zadanej temperatury T_w . Zasadniczym problemem jest tutaj przyjęcie funkcji opisującej zmiany współczynnika przewodzenia ciepła. Ze względu na zupełnie nieznaną charakter projektowanej zmienności przyjęto jeden z prostszych sposobów opisu, który powinien wskazać wymagany charakter zmian wspomnianego współczynnika. Założono, że funkcja

opisująca zmiany współczynnika przewodzenia ciepła jest funkcją sklejaną z wielomianów trzeciego stopnia z warunkiem ciągłości zapewniającym funkcji klasę C_1 . Interpolacyjna funkcja zlepiana zbudowana była na 20 węzłach, w których wartości współczynnika przewodzenia były zmiennymi projektowania $\{b_1, b_2, b_3, \dots, b_{20}\}$. Dodatkowo za zmienne projektowania przyjęto moc źródeł ciepła $b_{22}=f$ (rozłożonych wzdłuż linii Γ_f), oraz grubość warstwy sterującej b_{21} (rys. 4).



Rys. 4. Zmienne projektowania i parametry projektowania

Konsekwentnie wektor zmiennych projektowania miał postać $\mathbf{b}^T = \{b_1, b_2, b_3, \dots, b_{21}, b_{22}\}$. Przyjęta liczba zmiennych projektowania utrudnia sprawne przeprowadzenie procesu optymalnego projektowania (proces będzie czasochłonny), ale umożliwia w miarę precyzyjne, poznanie wymaganej zmienności współczynników przewodności cieplnej materiału warstwy sterującej przepływem.

Nierównomierność rozkładu temperatur na powierzchni roboczej kalandra (brzeg Γ_w) będzie eliminowana w procesie optymalnego projektowania. Aby umożliwić dobranie zmiennych projektowania tak, aby temperatura powierzchni roboczej była jak najbardziej zbliżona do zadanej temperatury, właściwej dla odpowiedniego procesu technologicznego, sformułowano problem optymalizacyjny w postaci:

$$\min G = \int_{\Gamma_w} (T(\mathbf{b}) - T_w)^2 d\Gamma_w \quad (3)$$

W zaproponowanym sformułowaniu minimalizuje się różnicę temperatur T punktów powierzchni roboczej i zadanej temperatury roboczej T_w wzdłuż brzegu roboczego Γ_w .

4 Strategia rozwiązywania problemu optymalizacyjnego

Do rozwiązania problemu (3) mogą być wykorzystane dowolne techniki minimalizacji funkcji wielu zmiennych bez ograniczeń takie jak metoda Gaussa, Hooke'a-Jeevesa, najszybszego spadku, gradientów

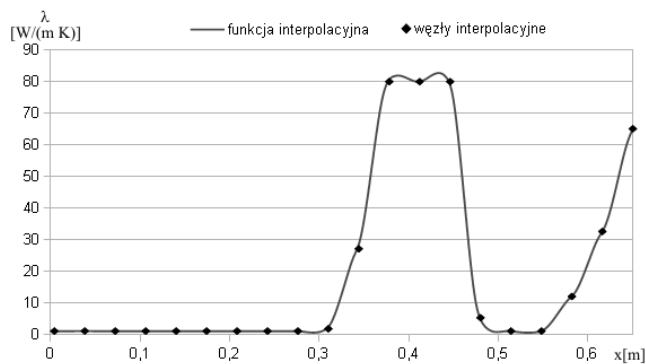
sprężonych, metody ewolucyjne lub ich kombinacje prowadzące do powstania algorytmów hybrydowych.

Problem (3) rozwiązano w tym przypadku wykorzystując hybrydowy algorytm optymalizacyjny będący szeregowym połączeniem zmiennoprzecinkowego algorytmu ewolucyjnego [9] i algorytmu Hooke'a-Jeevesa. W procesie ewolucyjnym wykorzystano selekcję turniejową, niejednorodne krzyżowanie heurystyczne i niejednorodną mutację gaussowską. Warunkiem stopu procesu ewolucyjnego była zadana liczba iteracji, po której proces optymalizacyjny prowadzony był zgodnie z algorytmem Hooke'a-Jeevesa.

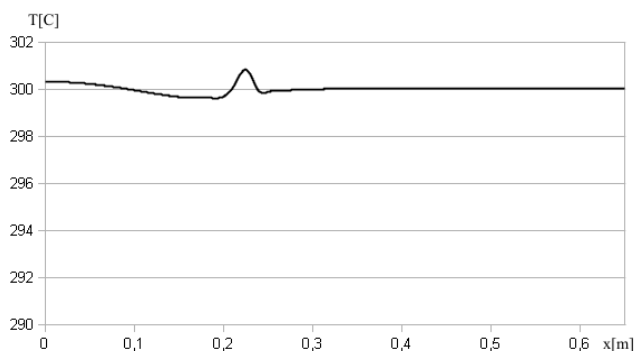
5 Przykład optymalnego projektowania

Obliczenia numeryczne zostały przeprowadzone dla parametrów wału kalandra (rys. 4): $r_w=0.2[m]$, $r_f=0.175[m]$, $r_c=0.1[m]$, $l_w=0.65[m]$, $l_k=0.8[m]$. Współczynnik przewodnictwa ciepła płaszcza kalandra jak i jego rdzenia przyjęto jak dla stali 45 równy $\lambda_r=44 [W/(m K)]$. Temperaturę otoczenia przyjęto $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Współczynnik konwekcji został tak dobrany jak dla wymiany ciepła przez niewymuszoną konwekcję z powietrzem $5 [W/(m^2 K)]$. Wymagana robocza temperatura T_w była równa 300°C .

Projektując parametry warstwy sterującej założono, że jej grubość spełnia warunek $b_{21} \in <0.01, 0.03>$. W celu pełniejszej ilustracji problemu rozpatrzono 2 przypadki, w których współczynniki przewodzenia ciepła warstwy sterującej spełniały założenia: 1. $\lambda_s \in <1, 80>$, 2. $\lambda_s \in <5, 60>$. Brzegowe, podane tutaj, wartości są współczynnikami przewodzenia ciepła materiałów wchodzących w skład materiału gradientowego.



Rys. 5. Rozkład współczynnika przewodzenia ciepła w warstwie sterującej dla przypadku $\lambda_s \in <1, 80>$

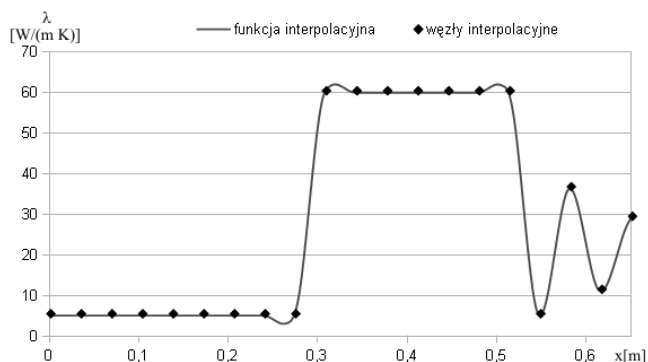


Rys. 6. Rozkład temperatur na powierzchni roboczej kalandra dla przypadku $\lambda_s \in \langle 1, 80 \rangle$

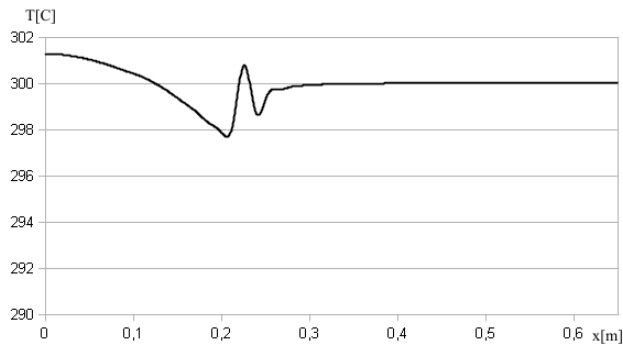
Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono rozwiązania otrzymane dla pierwszego analizowanego przypadku ilustrujące odpowiednio, zmianę współczynnika przewodzenia ciepła warstwy sterującej i rozkład temperatur powierzchni roboczej. Grubość warstwy sterującej, otrzymana w wyniku procesu optymalnego projektowania były równe 0.03[m].

Dla rozpatrywanego zadania parametry projektowania określające współczynniki przewodzenia ciepła, warstwy sterującej, osiągały miejscami wartości ekstremalne (dla $x \in \langle 0, 0.3 \rangle$ wartości minimalne, a dla $x \in \langle 0.35, 0.45 \rangle$ wartości maksymalne). Tak dobrane własności cieplne warstwy sterującej pozwoliły na utrzymanie temperatury powierzchni roboczej w granicach $\pm 1^\circ\text{C}$.

Na rysunkach 7 i 8 zilustrowano podobnie rozwiązania dla przypadku 2. Dla tego zadania otrzymano grubość warstwy sterującej 0.015[m].



Rys. 7. Rozkład współczynnika przewodzenia ciepła w warstwie sterującej dla przypadku $\lambda_s \in \langle 5, 60 \rangle$



Rys. 8. Rozkład temperatur na powierzchni roboczej kalandry dla przypadku $\lambda_s \in \langle 5, 60 \rangle$

Charakter otrzymanych, w tym przypadku, wykresów jest zbliżony do otrzymanych dla przypadku 1. Dla zmniejszonego zakresu zmienności współczynnika przewodzenia ciepła otrzymano mniejszą równomierność rozkładu temperatur powierzchni roboczych. Maksymalne odchylenie temperatury wynosiło tutaj 2.2 °C.

Anomalia otrzymanych funkcji przybliżających rozkład współczynników przewodzenia ciepła (widoczne na rysunkach 5 i 7 w miejscach szybkiej zmiany gradientu funkcji) są konsekwencją przyjętego sposobu opisu zmienności współczynnika przewodzenia ciepła warstwy sterującej.

6 Podsumowanie

W pracy przeanalizowano konkretne rozwiązania konstrukcyjne wału kalandry wykorzystujące zastosowanie materiałów gradientowych. Dla zaproponowanego rozwiązania konstrukcyjnego przeprowadzono proces optymalizacyjny, którego zasadniczym celem było określenie odpowiedniego rozkładu współczynnika przenikalności termicznej warstwy sterującej rozpięciem ciepła.

Analizę ustalonego przepływu ciepła przeprowadzono wykorzystując metodę elementów skończonych zaś proces optymalizacyjny przeprowadzono wykorzystując hybrydowy algorytm optymalizacyjny.

Otrzymane wyniki wykazały możliwość wyrównania temperatury powierzchni roboczej wału kalandry poprzez wprowadzenie w jego obszar warstwy materiału gradientowego o odpowiednio dobranej charakterystyce zmienności współczynnika przewodzenia ciepła.

Przeprowadzone obliczenia wykazały ponadto zależność otrzymanych rozwiązań od charakteru przyjętej funkcji opisującej zmienność własności cieplnych materiału gradientowego, co jest przyczynkiem do

poszukiwania odpowiednio elastycznego sposobu opisu tego typu zmienności i stowarzyszonego z nim, efektywnego algorytmu optymalizacyjnego.

7 Literatura

- [1] Turant J., *Optymalne projektowanie rozkładu źródeł ciepła w wale kalandra*, Zeszyty Naukowe WSInf vol 9, nr 2, 2010, s. 65-71
- [2] Turant J., *Wielokryterialne optymalne projektowanie przepływu ciepła w wale kalandra*, Zeszyty Naukowe WSInf vol 10, nr 2, 2011, s. 65-75
- [3] Turant J., *Optymalne projektowanie rozptywu ciepła w wale kalandra*, Zeszyty Naukowe WSInf vol 11, nr 3, 2012, s. 5-12
- [4] Sobczak J., Drenche L., *Metallic Functionally Graded Materials: A Specific Class of Advanced Composites*, Journal of Materials Science & Technology, 29(4), 2013, pp. 297-316
- [5] Kitagutchi S., Shimado N., Hamatani H. and others, *Development of Functionally Gradient Materials (FGMs) of thermal stress relaxation type*, Nippon Steel Technical Report, 57, 1993, pp. 28-32
- [6] Cho J. R., Ha D. Y., *Volume fraction optimization for minimizing thermal stresses in Ni-Al₂O₃ functionally graded materials*, Materials Science and Engineering: A, 334, 2002, pp. 147-155
- [7] Birman V., Byrd L. W., *Modeling and analysis of functionally graded materials and structures*, Applied Mechanics Reviews, 60, 2007, pp. 195-216.
- [8] Maciejewski G., Mróz Z., *Optimization of functionally gradient materials under cyclic thermal and mechanical loading*, proceedings of ECCOMAS Special Interest Conference Numerical Heat Transfer 2012, pp. 421-430
- [9] Dems K., Turant J., *Two approaches to optimal design of composite flywheel*, Engineering Optimization, 41, 4, 2009, pp. 351 - 363

CONTROL OF HEAT FLOW IN CALENDER SHAFT USING FUNCTIONALLY GRADIENT MATERIALS

Summary – In the paper the analysis of a heat flow in a calender shaft, which elements can be made of functionally gradient materials, is considered. The main operational problem of calenders is nonuniform temperature distribution along the working surface. The uniformness of temperature distribution may be controlled by introducing the layer, made of gradient materials with well defined thermal properties, which should be introduced between heating elements and working surface. As part of the work, the optimization process was performed to find the proper distribution of heat conduction coefficient in this layer, assuming that the layer is composed of a mixture of two materials having significantly different heat conduction properties. During optimization process hybrid algorithm, consisted with evolutionary algorithm combined, in series, with Hooke-Jeeves method was used. The analysis of the state of the calendar was done with finite element method.

Keywords: calender design, heat flow control, hybrid algorithm, functional gradient material