

Jan Turant
Politechnika Łódzka,
Katedra Mechaniki i Informatyki Technicznej
ul. Żeromskiego 116, 90-924 Łódź
email: jan.turant@p.lodz.pl

OPTYMALNE PROJEKTOWANIE ROZKŁADU ŹRÓDEŁ CIEPŁA W WALE KALANDRA

Streszczenie – W pracy analizowano przepływ ciepła w wałach kalandra. Ze względu na warunki pracy tego typu konstrukcji wymagana jest tutaj równomierność rozkładu temperatury na powierzchni roboczej. Głównym eksploatacyjnym problemem kalandrów jest nierównomierność rozkładu temperatur wzdłuż tworzącej wału kalandra. Równomierność rozkładu temperatur może być regulowana poprzez odpowiednią dystrybucję mocy grzałek wzdłuż osi wału kalandra. Optymalizację rozkładu mocy grzałek, prowadzącą do wyrównania temperatury powierzchni roboczej do temperatury wymaganej, przeprowadzono wykorzystując algorytm ewolucyjny, podczas gdy analiza zachowania się konstrukcji była przeprowadzana metodą elementów skończonych.

1 Wstęp

Optymalne sterowanie rozkładem temperatur w elementach konstrukcyjnych może być istotne ze względu na zachowanie określonych własności tych elementów lub parametrów technologicznych procesów, w których elementy te biorą udział. Nierównomierne nagrzanie elementów konstrukcyjnych powoduje powstanie w nich pól naprężeń wstępnych (bez względu na sposób ich podparcia) i może prowadzić do powstania dodatkowego obciążenia prowadzącego do zniszczenia konstrukcji. W elementach konstrukcyjnych nagrzewanych ze względu na wymogi procesu technologicznego, w którym biorą udział, często wymagany jest ściśle określony rozkład pól temperatur na ich powierzchniach roboczych, co ma często zasadniczy wpływ na własności wyrobu otrzymanego w wyniku tego procesu technologicznego. Do grupy elementów konstrukcyjnych tego typu należą wały kalandrów.

Kalandry lub inaczej gładziarki są szeroko wykorzystywanymi urządzeniami w przemyśle papierniczym i tekstylnym. W przemyśle tekstylnym wykorzystywane są do wygładzania takich materiałów jak bawełna i

len, a w przypadku materiałów syntetycznych do ich zgrzewania. W tym ostatnim przypadku włókniny wykonane z materiałów syntetycznych po procesie wygładzania nagrzanymi walcami kalandra uzyskują wyższą gładkość a poprzez zgrzanie włókien nowe własności użytkowe i wytrzymałościowe. W procesie gładzenia równie dobrze można uzyskiwać powierzchnie o niegładkiej fakturze wygniatając w gładzonym materiale wzór istniejący na powierzchni roboczej walca kalandra.

W każdym z podanych przykładowych zastosowań temperatura walca kalandra odgrywa dużą rolę, a w niektórych bardzo istotna jest również wysoka stałość temperatury na obwodzie walca kalandra i wzdłuż jego tworzącej. Wysokość temperatury w każdym punkcie powierzchni roboczej walca jest jednym z zasadniczych czynników (obok siły nacisku) determinujących własności otrzymanego materiału. Stałość tej temperatury i jej prawidłowe dobranie jest w szczególności istotne dla zgrzewanych włókien syntetycznych. Niezmienna temperatura i siła docisku walców kalandra wpływają na jednolite parametry otrzymanego materiału a czasem wręcz na jego dalszą przydatność. Różne temperatury ogrzewania, szczególnie wrażliwych włókien, mogą miejscowo powodować nadmierne topnienie włókien i różną wtedy strukturę otrzymanego materiału wyjściowego a w innych przypadkach, gdy temperatura jest za mała, skutkować to może niepołączeniem włókien i diametralnie innymi właściwościami otrzymanego materiału.

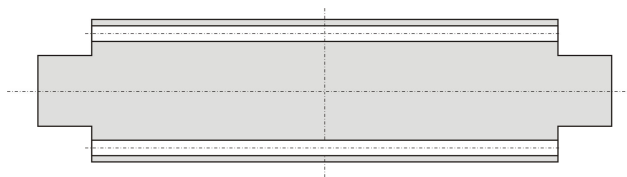
W przypadku włókien wykonanych z materiałów polimerowych temperatura pracy wałów kalandra powinna wynosić około 300 °C i jest ona funkcją grubości włókniny poddawanej procesowi gładzenia. Ustalona temperatura procesu powinna być utrzymana w zakresie $\pm 2^{\circ}\text{C}$. Utrzymanie takiej temperatury w tak wąskich granicach może być kłopotliwe ze względu na miejscowe rozmieszczenie elementów grzejnych, dodatkową wymianę ciepła na częściach czołowych wału kalandra czy istnienie czopów łożyskowych (rys.1), na których istnieją dodatkowe źródła ciepła będące konsekwencją pracy układu łożyskowego. W konsekwencji, temperatura wału kalandra może zmieniać się zarówno na jego obwodzie jak i wzdłuż jego osi.



Rys. 1. Schemat wału kalandra z otworami grzejnymi i czopami łożyskowymi

Wcześniejsze prace prowadzone przez autora wykazały pomijalnie małe zmiany temperatur na obwodzie wału kalandra, co jest bardzo pożądanym stanem ze względu na technologiczne warunki pracy tego typu urządzeń.

Kolejnym etapem analizy pracy wałów kalandra, ze względu na rozkład temperatur na jego powierzchni roboczej, jest zbadanie rozkładu temperatur wzdłuż osi wału. W konsekwencji postawionego zadania rozpatrzono jedynie przekrój wzdłużny walca kalandra (rys. 2), co jest oczywiście dużym uproszczeniem natomiast pozwala na łatwą analizę możliwości oddziaływania na rozkład temperatur przez różnorakie środki takie jak zmiana mocy grzałek wzdłuż osi wału kalandra czy zmiana kształtu osi otworu, wzdłuż którego zostaną wprowadzone grzałki. Technologicznie prostszym rozwiązaniem jest manipulowanie mocą grzałki wzdłuż jej długości przy założeniu jej stałej średnicy pociągającej za sobą stałą średnicę otworu gniazda grzałki w bloku wału kalandra. Tego typu rozwiązanie wymaga niestety skonstruowania grzałki o zmiennej gęstości nawoju drutu grzejnego w grzałce, co nie jest standardowym rozwiązaniem.



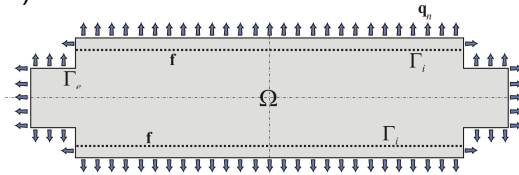
Rys. 2. Przekrój wzdłużny wału kalandra

W pracy tej skoncentrowano się nad wpływem rozkładu mocy grzałek wzdłuż osi wału kalandra na równomierność rozkładu temperatur wzdłuż jego powierzchni roboczej. Założono zmienną moc grzałek wzdłuż osi wału kalandra i aproksymowano ją krzywą Beziera drugiego rzędu. Analizę pracy pól termicznych wału przeprowadzono wykorzystując metodę elementów skończonych. Etap syntezy procesu optymalizacyjnego, w wyniku którego poszukiwano takiej dystrybucji mocy grzałek, która da możliwie równomierny rozkład temperatur na powierzchni roboczej, przeprowadzono wykorzystując algorytm ewolucyjny.

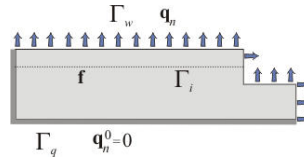
2 Sformułowanie problemu

Rozważmy przekrój wzdłużny walca kalandra wykonanego z izotropowego materiału o znanych własnościach termicznych (rys. 3). 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 krawędzi powstałe w skutek podziału wzdłuż osi symetrii (rys. 4).



Rys. 3. Obciążenie cieplne przekroju wzdłużnego wału kalandra



Rys. 4. Warunki brzegowe dla jednej czwartej przekroju wzdłużnego wału kalandra

Termiczne zachowanie się takiej konstrukcji w ustalonym stanie przewodzenia jest opisane typowymi równaniami w postaci:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{div} \mathbf{q} + \mathbf{f} &= 0 \\ \mathbf{q} &= -\lambda \nabla T \end{aligned} \right\} \text{ in } \Omega \quad (1)$$

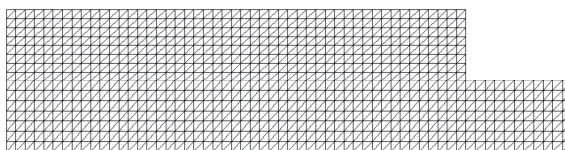
gdzie \mathbf{q} oznacza strumień ciepła, λ jest współczynnikiem konwekcji, ∇T jest gradientem pola temperatur a f oznacza intensywność źródeł ciepła wprowadzonych tutaj wzdłuż linii grzałki Γ_i . Równania (1) muszą być uzupełnione odpowiednimi warunkami brzegowymi zgodnie ze schematem obciążenia zaprezentowanym na rys. 4. W rozważanym przypadku przyjmą one postać:

$$\left. \begin{aligned} q_n &= \mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = q_n^0 & \text{na } \Gamma_q \\ q_n &= h(T - T_\infty) & \text{na } \Gamma_e \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

gdzie q_n^0 jest gęstością strumienia ciepłego, T_∞ oznacza temperaturę otoczenia, h jest współczynnikiem konwekcji ciepła do otoczenia, a \mathbf{n} jest wektorem normalnym do brzegu Γ_e .

3 Numeryczna analiza problemu

W celu przeprowadzenia analizy problemu opisanego równaniami (1) i (2) wykorzystano metodę elementów skończonych, zaprezentowaną dla tego typu zadań np. w [1]. Analizowany obszar zdyskretyzowano wykorzystując trójkątne elementy pierwszego rzędu. Proces dyskretyzacji przeprowadzono tak, aby powstałe elementy skończone miały w miarę regularne kształty. Powstały schemat podziału przekroju z rys. 4 pokazano na rys. 5. Podziału dokonano w ten sposób, aby liczba elementów wzdłuż długości walca była równa 120 a wzdłuż promienia walca kalandra 30.



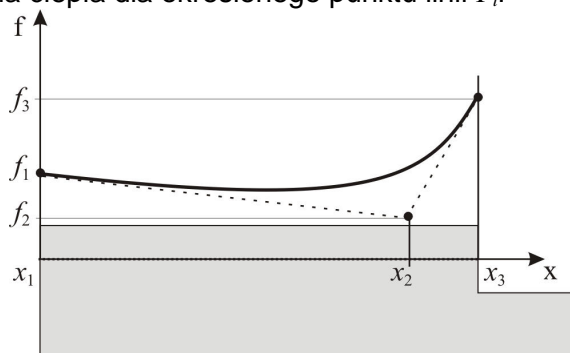
Rys. 5. Rozpatrywany przekrój podzielony na elementy skończone

4 Problem optymalizacyjny

Ze względu na zaobserwowaną, w trakcie analizy, nierównomierność rozkładu temperatur wzdłuż osi kalandra sformułowano problem optymalizacyjny, którego celem jest dobranie takiej dystrybucji mocy źródeł ciepła wzdłuż linii grzałki Γ_i aby temperatura powierzchni roboczej była jak najbardziej zbliżona do zadanej temperatury właściwej dla odpowiedniego procesu technologicznego. Konsekwentnie do sformułowanego problemu wprowadzono funkcjonal:

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

minimalizujący różnicę temperatur T punktów powierzchni roboczej i zadanej temperatury roboczej T_w wzdłuż brzegu roboczego Γ_w . Różne rozkłady temperatury powierzchni roboczej są wywoływane przez zmiany mocy źródeł ciepła rozłożonych wzdłuż linii Γ_i . Założono, że rozkład mocy źródeł ciepła zdefiniowany jest krzywą Beziea drugiego rzędu. Krzywą Beziea opisano we współrzędnych x - f (rys.6), gdzie współrzędna x określała współrzędną linii Γ_i a współrzędna f określała moc strumienia ciepła dla określonego punktu linii Γ_i .



Rys. 6. Krzywa Beziea i wielokąt Beziea opisujące zmiany mocy źródeł ciepła

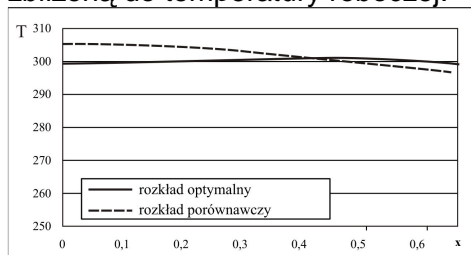
Ze względu na założony rząd krzywej Beziera i umieszczenie pierwszego i ostatniego punktu Beziera na końcach linii grzania zmiennymi projektowania były współrzędna określająca położenie węzła środkowego krzywej Beziera oraz moce źródła ciepła we wszystkich trzech punktach Beziera. Konsekwentnie wektor zmiennych projektowania miał cztery składowe $\mathbf{b}=\{x_2, f_1, f_2, f_3, \}$

Problem (3) rozwiązano wykorzystując zmiennoprzecinkowy optymalizacyjny algorytm ewolucyjny (opisany wcześniej na przykład w [2]), w którym wektor \mathbf{b} był traktowany jako chromosom a jego składowe jako geny. W procesie ewolucyjnym wykorzystano selekcję turniejową, krzyżowanie heurystyczne i niejednorodną mutację gaussowską. Warunkiem stopu procesu był relatywny brak poprawy najlepszego osobnika.

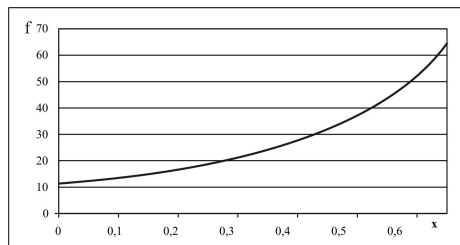
5 Przykład optymalnego projektowania

Obliczenia numeryczne zostały przeprowadzane dla wału kalandra o średnicy 0.4 [m], długości powierzchni roboczej 1.3 [m] oraz długości czopów łożyskowych 0.15 [m]. Współczynnik przewodnictwa przyjęto jak dla stali równy 84 [W/(m K)] a temperaturę otoczenia przyjęto równą 25 °C. Współczynnik konwekcji został tak dobrany jak dla wymiany ciepła przez niewymuszoną konwekcję z powietrzem 5 [W/(m² K)]. Wymagana robocza temperatura T_w była równa 300 °C.

Wykresy optymalnego, jak i porównawczego, rozkładu temperatur powierzchni roboczej wału kalandra przedstawiono na rys. 7. Porównawczy rozkład otrzymano z analizy pól termicznych wału kalandra o stałej intensywności źródeł ciepła wzdłuż linii grzania zakładając ich intensywność tak, aby otrzymać średnią temperaturę zbliżoną do temperatury roboczej.



Rys. 7. Temperatury powierzchni roboczej



Rys. 8. Dystrybucja mocy źródeł ciepła dla optymalnego rozkładu temperatur

Na rys. 8 pokazano rozkład mocy źródeł ciepła powodujący optymalny rozkład temperatur na powierzchni roboczej. W wyniku procesu optymalizacyjnego udało się zmniejszyć różnicę między

maksymalną i minimalną temperaturą w punktach powierzchni roboczej z 8.2 °C do 1.4 °C (rys. 7). Warto zauważyć, że otrzymana różnica 1.4 °C jest mniejsza od technologicznie wymaganej różnicy 2 °C, co daje możliwość prawidłowej pracy kalandra.

6 Podsumowanie

Ze względu na przyjęte uproszczenie związane z rozpatrywaniem jednego przekroju wzdłużnego wału kalandra wyniki procesu optymalizacyjnego nie mogą być w pełni miarodajne, ale z pewnością mogą być pierwszą wytyczną do modelowania dystrybucji mocy grzałek kalandra. Przeprowadzona analiza wykazała zbliżone do rzeczywistych rozkłady temperatur powierzchni roboczej dla przypadku równomiernej dystrybucji źródeł ciepła, co może wskazywać na stosowalność przyjętego uproszczenia i sensowność otrzymanych wyników. Dalsze prace mogą być związane z badaniem innych czynników wpływających na równomierność rozkładu temperatur na powierzchni roboczej wałów kalandra dla zaproponowanego uproszczonego modelu. Badania te mogą być podstawą dla optymalizacji parametrów trójwymiarowego modelu wału kalandra.

Literatura

- [1] Białecki R., Fic A. i inni, *Modelowanie numeryczne pól temperatury*, WNT, Warszawa, 1992
- [2] Dems K., Turant J., *Two Approaches to Optimal Design of Composite Flywheel*, Engineering Optimization, 41, 4, 2009, pp. 351 – 363

THE OPTIMAL DESIGN OF HEAT SOURCES DISTRIBUTION IN CALENDER

Summary – In the paper the analysis of a heat transfer for a calender is considered. With respect to working condition of this type of systems the highest smoothness of temperature field on the working surface is demanded. The main problem is the nonuniform temperature distribution on the working surface along calendar axis. The uniformness of the field temperature can be ensured by manipulating of heat sources distribution. The optimal design of heat distribution, leading to uniform temperature of given value, is carried out using evolutionary algorithm when the analysis of the state of the calendar is done with finite element method.