

Jan Turant

Katedra Mechaniki i Informatyki Technicznej
Politechnika Łódzka

WIELOKRYTERIALNE OPTYMALNE PROJEKTOWANIE PRZEPŁYWU 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 przy równoczesnej minimalizacji temperatur czopów łożyskowych. Głównym eksploatacyjnym problemem kalandrów jest nierównomierność rozkładu temperatur wzdłuż tworzącej wału kalandra. Wysoki poziom temperatury tych powierzchni powoduje złe warunki pracy łożysk tocznych, na których osadzony jest wał kalandra. Równomierność rozkładu temperatur może być regulowana poprzez odpowiednią dystrybucję mocy grzałek wzdłuż osi wału kalandra, natomiast sterownie strumieniem ciepła, tak aby propagował on w kierunku powierzchni roboczych a nie czopów wału, może być osiągnięte poprzez inne warunki przewodzenia w kierunku tych powierzchni. Optymalizację rozkładu mocy grzałek oraz topologiczno-materiałowych parametrów kalandra przeprowadzono wykorzystując algorytm hybrydowy (będący szeregowym połączeniem algorytmu ewolucyjnego i Hooke-Jeevesa), 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 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 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 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 dodatkową wymianę ciepła na częściach czółowych wału kalandra czy istnienie czopów łożyskowych (rys.1). W konsekwencji, temperatura wału kalandra zmienia się przede wszystkim wzdłuż jego osi wykazując w normalnych warunkach pracy pomijalnie małe zmiany na obwodzie wału.

Innym problemem, dla konstrukcji tego typu, jest wysoka temperatura czopów łożyskowych spowodowana nagrzewaniem powierzchni roboczej. Wysoki poziom temperatur czopów łożyskowych wpływa niekorzystnie na warunki eksploatacyjne łożysk tocznych, na których wał kalandra mógłby być osadzony.

Wymienione dwa kryteria eksploatacyjne – wysoka, równomiernie dystrybuowana temperatura powierzchni roboczej i niska temperatura czopów łożyskowych są w istocie trudnymi do pogodzenia.



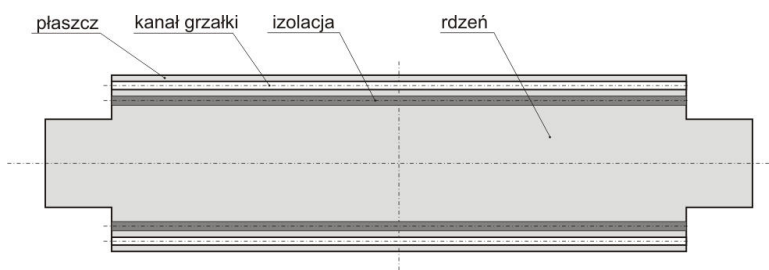
Rys. 1. Schemat wału kalandra z otworami grzejnymi i czopami łożyskowymi

Analizę pracy wałów kalandra, ze względu na rozkład temperatur na jego powierzchni roboczej, w funkcji rozkładu mocy grzałek wzdłuż osi wału przedstawiono w [6].

W pracy tej zajęto się dodatkowo problemem minimalizacji temperatur na powierzchniach czopów przy równoczesnym założeniu jej stałości (na określonym poziomie) na powierzchni roboczej.

Założono, że wał kalandra jest konstrukcją kompozytową składającą się z rdzenia wału, warstwy izolacyjnej i warstwy płaszcz, w której rozmieszczono kanały na elementy grzejne, rys.2.

Podobnie jak w [6] 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 parametrów materiałowych i geometrycznych obszarów wału. Sterowanie mocą grzałki, wzdłuż jej długości, przy założeniu jej stałej średnicy, wymaga skonstruowania grzałki o zmiennej gęstość nawoju drutu grzejnego w grzałce, co nie jest standardowym rozwiązaniem.

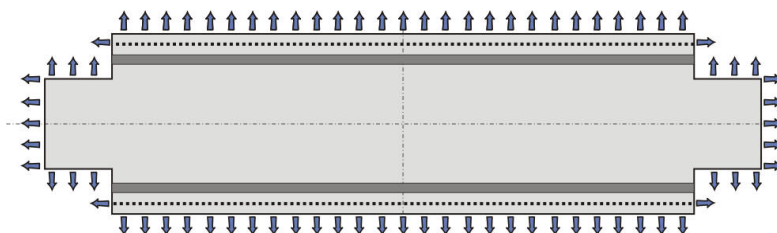


Rys. 2. Przekrój wzdłużny wału kalandra

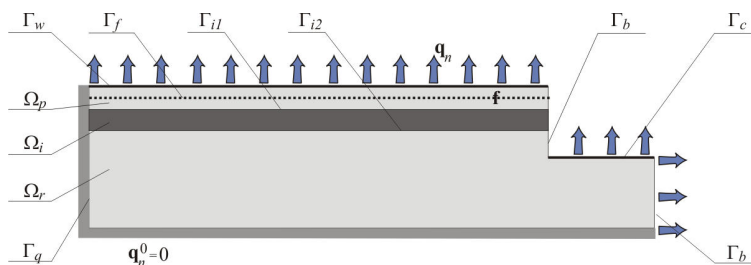
Analizę pracy pól termicznych wału przeprowadzono wykorzystując metodę elementów skończonych. Etap syntezy procesu optymalizacyjnego przeprowadzono wykorzystując algorytm hybrydowy.

2 Sformułowanie problemu

Rozważmy przekrój wzdłużny walca kalandra wykonanego z izotropowych materiałów płaszczka, izolacji i rdzenia (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 krawędzie 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:

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

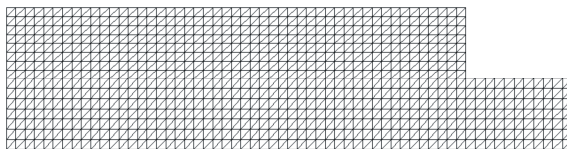
gdzie \mathbf{q} oznacza strumień ciepła, λ_{ind} jest współczynnikiem konwekcji odpowiedniego obszaru, ∇T jest gradientem pola temperatur a \mathbf{f} oznacza intensywność źródeł ciepła - różnych od zera tylko w obszarze Ω_p . Równania (1) muszą być uzupełnione odpowiednimi warunkami brzegowymi zgodnie ze schematem obciążenia zaprezentowanym na rys. 4 oraz warunkami ciągłości wzdłuż brzegów wewnętrznych. W rozważanym przypadku przyjmą one postać:

$$\begin{aligned} q_n &= \mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = q_n^0 && \text{na } \Gamma_q \\ q_n &= h(T - T_\infty) && \text{na } \Gamma_w, \Gamma_b, \Gamma_c \\ \Delta T &= 0 && \text{na } \Gamma_{i1}, \Gamma_{i2} \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie q_n^0 jest gęstością strumienia cieplnego, 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.

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 możliwie regularne kształty. Dyskretyzacje przekroju z rys. 4 pokazano na rys. 5.



Rys. 5. Rozpatrywany przekrój podzielony na elementy skończone

Podziału dokonano w ten sposób, aby liczba elementów wzdłuż długości walca była równa 120 a wzdłuż promienia walca kalandra 30.

4 Problem optymalizacyjny

Nierównomierność rozkładu temperatur na powierzchni roboczej kalandra (brzeg Γ_w) jak i nadwyżka wysoka temperatura czopów łożyskowych (brzeg Γ_c) mogą być eliminowane w procesie optymalnego projektowania takiej konstrukcji. W sposób oczywisty mamy tutaj do czynienia z problemem, w którym występują dwa różne kryteria. Istotność tych kryteriów nie jest zapewne taka sama, bo jedno (temperatura powierzchni roboczej) wpływa na zasadniczą cechę funkcjonalną urządzenia powodując jego poprawne lub niepoprawne działanie, podczas gdy drugie (temperatura czopów łożyskowych) wpływa „jedynie” na żywotność węzłów łożyskowych. Problem optymalizacyjny dla takiego zadania może być sformułowany w różnoraki sposób.

Jednym ze sformułowań problemu optymalizacyjnego może być minimalizacja funkcjonu różnicy temperatur powierzchni roboczej wraz z powierzchnią czopów i zadanej temperatury ich pracy. Problem ten może być zapisany w postaci:

$$\begin{aligned} \min G_1 &= \frac{1}{L_w} \int_{\Gamma_w} (T(\mathbf{b}) - T_w)^2 d\Gamma_w \\ \min G_2 &= \frac{1}{L_c} \int_{\Gamma_c} (T(\mathbf{b}) - T_c)^2 d\Gamma_c \end{aligned} \quad (3)$$

gdzie T_w , L_w oznaczają odpowiednio zadaną temperaturę brzegu roboczego i jego długość, a T_c , L_c są tego samego typu wielkościami dla czopa wału, zaś \mathbf{b} jest wektorem zmiennych projektowania. Tak zdefiniowane funkcjonały G_1 i G_2 opisują średnie różnice kwadratów odchyłek temperatury rzeczywistej i założonej.

Podobny efekt, jak przy rozwiązaniu problemu (3), można by otrzymać wymagając spełnienia tego samego kryterium dla powierzchni roboczej zakładając jednocześnie minimalizację maksymalnych lokalnych temperatur na brzegu czopa, co można zapisać w postaci:

$$\begin{aligned} \min G_1 &= \frac{1}{L_w} \int_{\Gamma_w} (T(\mathbf{b}) - T_w)^2 d\Gamma_w \\ \min G_3 &= \left(\frac{1}{L_c} \int_{\Gamma_c} \left(\frac{T(\mathbf{b})}{T_c} \right)^p d\Gamma_c \right)^{\frac{1}{p}} \end{aligned} \quad (4)$$

gdzie p jest dużą parzystą liczbą naturalną, która dążąc do nieskończoności tworzy z funkcjonu G_3 ścisłą miarę maksymalnych lokalnych temperatur.

Sformułowanie problemu optymalizacyjnego dla analizowanego zadania można również zapisać w postaci jedonkryterialnej, minimalizując funkcjonał G_1 przy założeniu nieprzekraczalności temperatur na powierzchniach czopów. Problem taki przyjąłby postać:

$$\begin{aligned} \min G_1 &= \frac{1}{L_w} \int_{\Gamma_w} (T(\mathbf{b}) - T_w)^2 d\Gamma_w \\ T(\mathbf{b}) &\leq T_c \quad \text{na } \Gamma_c \end{aligned} \quad (5)$$

Tego typu sformułowanie zmusza nas przede wszystkim do wybrania rozwiązania z obszaru dopuszczalnego, zdefiniowanego temperaturami czopów, czyniąc z temperatur powierzchni czopów łożyskowych nadrzędną cechą rozwiązania. Konsekwentnie znacznie trafniejszym

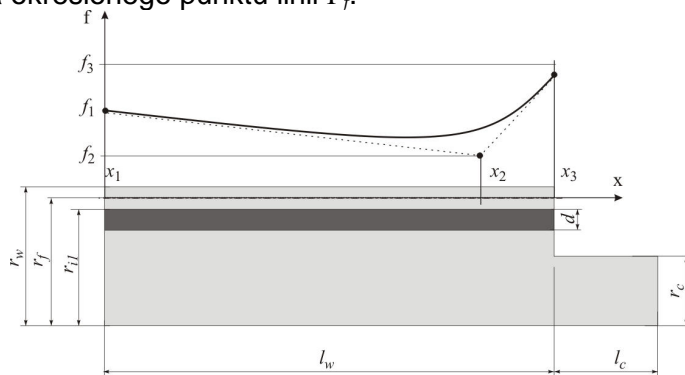
sformułowaniem byłaby minimalizacja temperatur powierzchni czopów łożyskowych przy założeniu niezmienności, w pewnym zakresie, temperatury powierzchni roboczej.

$$\min G_3 = \left(\frac{1}{L_c} \int_{\Gamma_c} \left(\frac{T(\mathbf{b})}{T_c} \right)^p d\Gamma_c \right)^{\frac{1}{p}} \quad (6)$$

$$T(\mathbf{b}) \leq T_{gw} \quad T(\mathbf{b}) \geq T_{dw} \quad \text{na } \Gamma_w$$

gdzie T_{dw} i T_{gw} są odpowiednio dolnym i górnym zakresem zmienności temperatury powierzchni roboczej.

Różne rozkłady temperatury powierzchni roboczej i powierzchni czopów wału wywoływane są przez zmiany mocy źródeł ciepła rozłożonych wzdłuż linii Γ_f jak i przez zmiany parametrów warstwy izolacyjnej płaszcza kalandra. Założono, że rozkład intensywności źródeł ciepła zdefiniowany jest krzywą Beziera drugiego rzędu. Krzywą Beziera opisano we współrzędnych $x-f$ (rys.6), gdzie współrzędna x określała współrzędną linii Γ_f a współrzędna f określała intensywność strumienia ciepła dla określonego punktu linii Γ_f .



Rys. 6. Geometryczne parametry i zmienne projektowania wału kalandra

Ze względu na założony rząd krzywej Beziera i umieszczenie pierwszego i ostatniego punktu Beziera na końcach linii grzania wśród zmiennych projektowania znalazły się współrzędna określająca położenie węzła środkowego krzywej Beziera oraz intensywności źródła ciepła we wszystkich trzech punktach Beziera.

Sterowanie parametrami warstwy izolacyjnej może odbywać się poprzez zmiany jej grubości d lub współczynnika przewodzenia ciepła λ_i materiału tej warstwy. Konsekwentnie rozpatrzono dwa warianty projektowania. W pierwszym wektor zmiennych projektowania uzupełniono grubością warstwy izolacyjnej $\mathbf{b}=\{f_1, f_2, f_3, x_2, d\}$ w drugim

zaś przypadku własnościami warstwy izolacyjnej sterowano poprzez współczynnik przewodzenia $\mathbf{b}=\{f_1, f_2, f_3, x_2, \lambda_i\}$.

Dla potrzeb optymalnego projektowania kalandra wybrano problem optymalizacyjny (3).

5 Techniki rozwiązywania problemów wielokryterialnych

Literatura dotycząca optymalizacji wielokryterialnej jest bardzo szeroka a jej opisom szczegółowym, ogólnym i konkretnym zastosowaniom są poświęcone między innymi [4,1,5]. Wśród metod takiej optymalizacji możemy wymienić takie metody jak: metoda sum ważonych, metoda globalnych kryteriów ważonych, metoda ograniczonych kryteriów, metoda leksykograficzna czy metody z wykorzystaniem ocen rozmytych.

Dla potrzeb rozwiązania problemu optymalizacyjnego (3) zastosowano metodę globalnych kryteriów ważonych. Metoda ta, daje możliwości sterowania poziomem istotności kryteriów przez wagi, abstrahując od bezwzględnej wartości poszczególnych funkcjonałów dla zadanego wektora zmiennych decyzyjnych. Metoda ta wprowadza miarę odległości poszczególnych kryteriów od rozwiązań optymalnych ze względu na każde z tych kryteriów oddzielnie. Miara taka może być zarówno miarą bezwzględną jak i względną odniesioną do odpowiedniego rozwiązania optymalnego. Zastępczy jednokryterialny problem optymalizacyjny uwzględniający względną miarę tego typu, bez uwzględnienia ograniczeń, może być zapisana w następujący sposób:

$$\min G_z = \left(\sum_{i=1}^m \left(w_i \frac{G_i - G_i^{opt}}{G_i^{opt}} \right)^p \right)^{\frac{1}{p}} \quad \text{dla } \sum_{i=1}^m w_i = 1 \quad (7)$$

gdzie G_i , G_i^{opt} i w_i są odpowiednio wartością i -tego funkcjonału w zadanym punkcie i w rozwiązaniu optymalnym dla problemu $\min G_i$, oraz wagą przydzieloną odpowiedniemu funkcjonałowi. Wykładnik p przyjmowany jest z zakresu $(1, \infty)$. Dla wartości 2 funkcjonał ten staje się euklidesową miarą odległości rozwiązań od rozwiązań optymalnych a dla wartości dążących do ∞ jest miarą maksymalnych tego typu odległości.

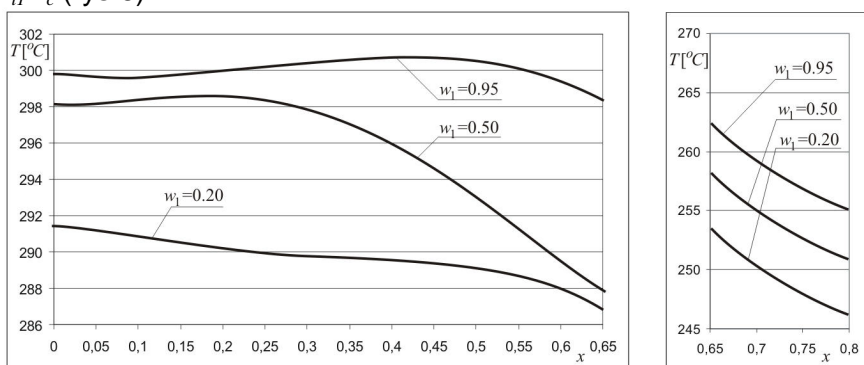
Do rozwiązania problemu (6) mogą być wykorzystane dowolne techniki minimalizacji funkcji wielu zmiennych bez ograniczeń takie jak metoda Hookea-Jeevesa, najszybszego spadku, gradientów sprzężonych, metody ewolucyjne lub ich kombinacje prowadzące do powstania algorytmów hybrydowych.

Problem typu (6) dla zadania optymalizacyjnego (3) rozwiązano wykorzystując hybrydowy algorytm optymalizacyjny będący szeregowym połączeniem zmiennoprzecinkowego algorytmu ewolucyjnego [2] 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.

6 Przykład optymalnego projektowania

Obliczenia numeryczne zostały przeprowadzone dla parametrów wału kalandra (zgodnie z rys. 4): $r_w=0.2$ [m], $r_f=0.17$ [m], $r_{il}=0.14$ [m], $r_c=0.1$ [m], $l_w=0.65$ [m], $l_c=0.15$ [m]. Współczynnik przewodnictwa ciepła płaszczka kalandra jak i jego rdzenia przyjęto jak dla stali 45 równy 44 [W/(m K)], współczynnik przewodnictwa materiału izolacyjnego (jeśli był parametrem) przyjęto 0.8 [W/(m K)], a temperaturę otoczenia przyjęto 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, podczas gdy zalecana temperatura czopa wału T_w była 100 °C.

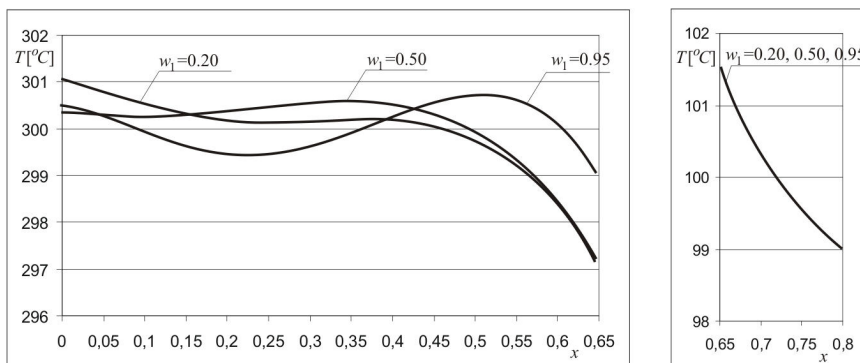
W wyniku procesu optymalnego projektowania, dla przypadku projektowania rozkładu mocy grzałek i grubości warstwy izolacyjnej, nie udało się zmniejszyć temperatury czopów do poziomu zalecanej temperatury – bez względu na przyjętą wagę funkcjonału G_2 . Otrzymywana grubość warstwy izolacyjnej była zawsze maksymalna $d=r_{il}-r_c$ (rys.6).



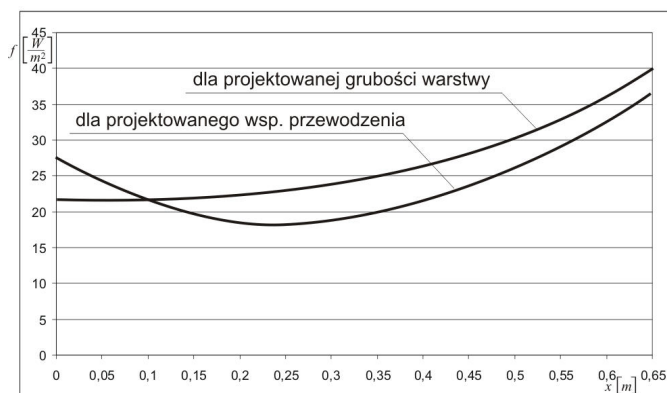
Rys. 7. Temperatury powierzchni roboczej i czopa dla optymalnych rozwiązań przy różnych wagach w problemie (6) – zmienna grubość warstwy izolacyjnej

Dla przypadku dużej istotności funkcjonału G_1 , wyrażonej wagą

$w_1=0.95$, otrzymano redukcję maksymalnej temperatury powierzchni czopa z 283°C (dla konstrukcji bez warstwy izolacyjnej) do 262°C czyli o 21°C przy maksymalnej odchyłce temperatury powierzchni roboczej 1.8°C od wymaganej temperatury 300°C - co jest wystarczające ze względu na założone wymogi procesu technologicznego. Wykresy otrzymanych rozkładów temperatur na brzegu roboczym i czopa, dla trzech różnych wag funkcjonału G_1 , przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 8. Temperatury powierzchni roboczej i czopa dla optymalnych rozwiązań przy różnych wagach w problemie (6) – zmienny współczynnik przewodzenia ciepła dla warstwy izolacyjnej



Rys. 9. Zaprojektowany optymalny rozkład intensywność źródeł ciepła grzałek dla obu przypadków projektowych dla wagi 0.95 funkcjonał G_1

Rozwiązując problem optymalizacyjny (3) dla przypadku dobierania odpowiedniego współczynnika przewodzenia ciepła dla materiału warstwy izolacyjnej (przy założonym jej wymiarze $d=0.02$) otrzymano

jednoczesne, zadawalające spełnienie obu kryteriów optymalizacyjnych. Temperatury punktów powierzchni czopa nie różniły się od zalecanej temperatury więcej jak $1.5[^\circ\text{C}]$ - bez względu na przyjętą wagę funkcjonału G_2 , rys. 8. W przypadku optymalnego rozkładu temperatur powierzchni roboczej zadawalające wyniki otrzymano dla wagi 0.95 funkcjonału G_1 . W tym przypadku temperatury punktów powierzchni roboczej różniły się od temperatury wymaganej mniej niż $1[^\circ\text{C}]$ (rys. 8) co jest bardzo dobrym wynikiem ze względu na poprawność działania urządzenia. Należy zauważyć, że znalezione optymalne rozwiązanie dla $w_1=0.95$ i $w_2=0.05$ otrzymano dla współczynnika przewodzenia ciepła warstwy izolacyjnej 0.0013 - co jest bardzo małą wartością i aktualnie wiąże się z trudnościami w określeniu odpowiedniego materiału o takiej własności.

Optymalne rozkłady intensywności źródeł ciepła dla wagi $w_1=0.95$, zapewniające wyrównanie temperatur powierzchni roboczej, dla obu przypadków projektowania pokazano na rys. 9.

7 Podsumowanie

Ze względu na przyjęte uproszczenie związane z rozpatrywaniem jednego przekroju wzdłużnego wału kalandra wyniki procesu optymalizacyjnego nie mogą być w pełni miarodajne, ale mogą być wytyczną dla konstruktorów. W każdym analizowanym przypadku wektora zmiennych projektowania udało się sprowadzić temperatury punktów powierzchni roboczej do wymaganej technologicznie. Rozwiązania konstrukcyjne z wprowadzoną warstwą izolującą nagrzewany płaszcz roboczy od rdzenia wału pozwalają jedynie na nieznaczne zmniejszenie temperatur czopów łożyskowych (dla materiału izolacyjnego, którym był materiał ceramiczny) przy jednoczesnym zachowaniu wymaganej temperatury powierzchni roboczej. Należy zauważyć, że takie zmniejszenie temperatury czopów łożyskowych będzie w oczywisty, choć nieznaczny, sposób wpływało na wydłużenie czasu eksploatacji urządzenia. Zmniejszanie temperatury czopów łożyskowych jest wyraźnie efektywniejsze dla materiałów izolacyjnych o mniejszych współczynnikach przewodzenia i w granicznym przypadku może prowadzić do ustalenia żądanych temperatur powierzchni czopów i powierzchni roboczej – dla materiałów izolacji o współczynniku przewodzenia ciepła rzędu 0.001.

Literatura

- [1] Arora J. S., *Introduction to Optimum Design*, Elsevier Academic Press, 2004
- [2] Białycki R., Fic A. i inni, *Modelowanie numeryczne pól temperatury*, WNT, Warszawa, 1992
- [3] Doms K., Turant J., *Two Approaches to Optimal Design of Composite Flywheel*, *Engineering Optimization*, 41, 4, 2009, pp. 351 – 363
- [4] Eschenauer H., Koski J., Osyczka A., *Multicriteria Design Optimization*, Springer-Verlag, Berlin 1990.
- [5] Proos K. A., Steven G. P. and others, *Multicriterion Evolutionary Structural Optimization Using the Weighting and the Global Criterion Methods*, *AIAA Journal*, Vol. 39, No. 10, October 2001
- [6] Turant J., *Optymalne projektowanie rozkładu źródeł ciepła w wale kalandra*, *Zeszyty Naukowe WSInf vol 9, nr 2*, 2010, s. 65-71

MULTIOBJECTIVE OPTIMAL DESIGN OF HEAT FLOW IN CALENDER SHAFT

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 as well as minimization of temperatures on bearing journals. The main problem is the nonuniform temperature distribution on the working surface along calendar axis. The high level of its temperature causes bad working conditions of bearings of calender. The uniformness of the field temperature can be ensured by manipulating of heat sources distribution when manipulating of heat stream, to reduce bearing journals temperature, is possible using different conduction conditions in directions to working surface and to bearings. The optimal design of heat distribution and conduction properties is carried out using hybrid algorithm (consisting with evolutionary algorithm combined, in series, with Hooke-Jeeves method) when the analysis of the state of the calendar is done with finite element method.