

SIMULATION OF THE EFFECT OF CONTACT THERMAL RESISTANCE ON THERMAL STATE OF EXHAUST VALVES DURING THE COLD START OF ENGINE

Zdzisław Nagórski

*Warsaw University of Technology, Institute of Vehicles
02-524 Warszawa, ul. Narbutta 84
tel.: +48 22 660 8783
e-mail: znak@simr.pw.edu.pl*

Abstract

This paper presents a comparison of the transient heat flow in two exhaust valves for a different resistance of thermal contact between the valve head and valve seat as well as between the valve stem and valve guide during the cold start of a four-stroke engine. This work continues the earlier study in this subject [5]. Previously, the models considered thermal changes in the working medium, thermal changes in the heat transfer coefficients on the surfaces of valves during the work cycle, changes in temperature of the valve seats and valve guides in time, various thermo physical properties of materials for the valve head and valve stem, as well as the effect of valve movement from the valve seat and valve guide. In this study, the models were modified in order to consider the effect of contact thermal resistance between the valve head and valve seat and between the valve stem and valve guide on the temperature field in valves. The simulation was made using the KM3R method [4]. The results of simulation showed essential differences in the temperature field that were caused among other things by changes in contact thermal resistance between the elements of valve unit.

BADANIA SYMULACYJNE WPŁYWU KONTAKTOWEGO OPORU CIEPLNEGO NA STAN CIEPLNY ZAWORÓW WYLOTOWYCH PODCZAS „ZIMNEGO” ROZRUCHU SILNIKA

Streszczenie

Przedstawiono badania symulacyjne nieustalonego przepływu ciepła w dwóch zaworach wylotowych, przy różnych kontaktowych oporach cieplnych zespołów: grzybek – gniazdo zaworu oraz trzonek – prowadnica zaworu, podczas „zimnego” startu czterosuwowego silnika tłokowego. W modelu symulacyjnym [5], opracowanym metodą KM3R [4], zawory poddano takim samym wymuszeniom cieplnym, tzn. uwzględniono zmianę temperatury czynnika roboczego, współczynników przejmowania ciepła na powierzchniach zaworów w cyklu roboczym, zmianę temperatury gniazd i prowadnic zaworowych w funkcji czasu, różne właściwości termofizyczne materiałów grzybków i trzonek oraz efekt zmiany położenia zaworów względem gniazd i w prowadnicach. Dla potrzeb tego opracowania, w modelu [5] wprowadzono ww. kontaktowe opory cieplne. Badania porównawcze modeli zaworów w czasie „zimnego” rozruchu silnika wykazały istotne różnice w polach temperatury, zależne m. in. od jakości kontaktu cieplnego między ww. elementami.

1. Wprowadzenie

Okres „zimnego” rozruchu tłokowego silnika spalinowego charakteryzuje się - oprócz emisji szczególnie szkodliwych, niskotemperaturowych produktów spalania - występowaniem znacznych obciążeń cieplnych w elementach silnika, kontaktujących się z gorącymi spalinami. Obciążenie cieplne elementu konstrukcyjnego wiąże się z przepływem nieustalonego strumienia ciepła w materiale tego elementu. Strumień ten zmienia lokalne wartości energii wewnętrznej (jej miarą jest lokalna temperatura), która wpływa na zmianę właściwości termofizycznych materiału konstrukcyjnego, a ponadto wywołuje lokalne gradienty temperatury, które są odpowiedzialne za rozkłady naprężeń termomechanicznych i zależnych od nich - odkształceń cieplnych elementu.

W silniku spalinowym jest szereg elementów, których funkcjonowanie w warunkach

przepływu zmiennego w czasie strumienia ciepła musi być niezawodne. Do takich elementów należą m. in. zawory wylotowe [1]. W celu bliższego poznania zależności między parametrami cyklu roboczego i polem temperatury w tych zaworach, zbudowano trójwymiarowy model symulacyjny nieustalonego przepływu ciepła (opisany bliżej w referacie [5]) w dwóch różnych zaworach, poddanych takim samym wymuszeniom cieplnym, występującym podczas tzw. „zimnego” rozruchu silnika. W modelu [5], zbudowanym metodą KM3R [4], uwzględniono zmienność temperatury ładunku roboczego i współczynników przejmowania ciepła na powierzchniach zaworów w powtarzalnych cyklach pracy oraz niezależne przebiegi temperatury gniazda i przewodnicy zaworu w funkcji czasu. Uwzględniono także efekty cieplne, wynikające ze zmiany położenia zaworów w przewodnicach i gniazdach.

Warstwa nagaru na przyłgni gniazda lub „przypalonego” oleju na powierzchni ślizgowej przewodnicy trzonka wpływa na intensywność przepływu ciepła między zaworem a tymi powierzchniami. Dobry kontakt cieplny między tymi elementami ułatwia odprowadzenie ciepła z zaworu, co sprzyja zmniejszeniu jego średniej temperatury. W celu oceny kontaktowej wymiany ciepła na powierzchniach zaworów, wprowadzono opcjonalnie warunki IV rodzaju z oporami cieplnymi: grzybek - gniazdo i trzonek - przewodnica.

Kontaktowy opór cieplny R warstwy o grubości g_w i współczynniku przewodzenia ciepła λ_w określa zależność

$$R = \frac{g_w}{\lambda_w} . \quad (1)$$

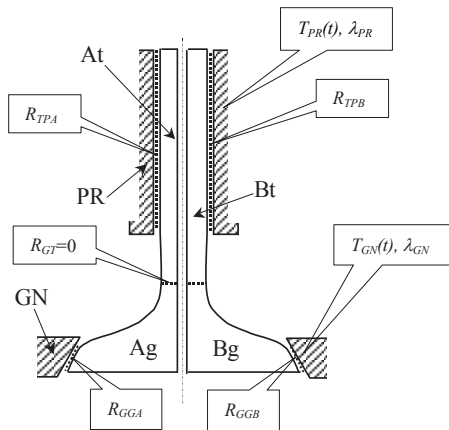
Opór cieplny odnosi się zwykle do bardzo cienkiej warstwy „trzeciego” materiału w miejscu styku dwóch innych materiałów, a jego obecność charakteryzuje skokowa zmiana temperatury (tzw. uskok temperaturowy). Zwykle małe grubości warstwy g_w i wartości współczynnika λ_w , dają bardzo małe wartości R .

2. Model symulacyjny przepływu ciepła w zaworach wylotowych uwzględniając kontaktowe opory cieplne grzybek – gniazdo i trzonek – przewodnica

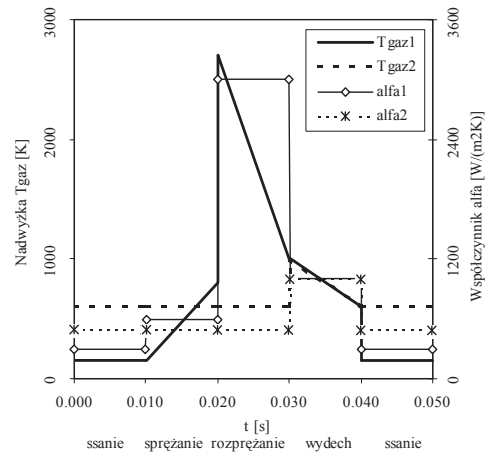
Założenie osiowej symetrii wymuszeń cieplnych na powierzchniach zaworów i osiowej symetrii zaworów, pozwala ograniczyć geometrię modelu obliczeniowego do dwóch wycinków („ćwiartek”) każdego z nich. Materiały trzonek i grzybków zaworów A i B (rys. 1), podobnie jak materiały gniazd GN i przewodnic PR, mogą mieć niezależne właściwości termofizyczne. Współczynniki wyrównywania temperatury a ($a = \lambda / (c_p \rho)$), gdzie: λ – współczynnik przewodzenia ciepła, c_p – ciepło właściwe, ρ – gęstość) materiałów trzonek A_t i B_t wynoszą odpowiednio a_{At} i a_{Bt} oraz grzybków a_{Ag} i a_{Bg} . Między gniazdami GN, o współczynniku przewodzenia ciepła λ_{GN} , a grzybkami Ag i Bg mogą wystąpić kontaktowe opory cieplne R_{GGA} i R_{GGB} , natomiast między przewodnicami PR (o znanym λ_{PR}) a trzonkami A_t i B_t – opory cieplne R_{TPA} i R_{TPB} . Założono, że w miejscu złączenia grzybków z trzonkami jest idealny kontakt cieplny $R_{GT} = 0$ oraz, że temperatury gniazda T_{GN} i przewodnicy T_{PR} są wykładniczymi funkcjami czasu t .

Na rysunku 2 pokazano przebiegi nadwyżek temperatury gazów $T_{gaz1}(t)$ i $T_{gaz2}(t)$ (nadwyżki temperatury są różnicą temperatury bieżącej i początkowej (startowej) zaworu, równej np. 293 K) oraz współczynników przejmowania ciepła $\alpha_1(t)$ i $\alpha_2(t)$, podczas cyklu roboczego silnika czterosuwowego, w którym przez ok. $\frac{3}{4}$ cyklu zawór jest zamknięty a przez $\frac{1}{4}$ cyklu – otwarty. Podczas, gdy zawór jest zamknięty, czoło talerzyka przejmuje ciepło przy współczynniku $\alpha_1(t)$ od gazu o temperaturze $T_{gaz1}(t)$, natomiast powierzchnia stożkowa grzybka i odsłonięta część trzonka przejmuje ciepło przy współczynniku $\alpha_2(t)$ od gazu o temperaturze $T_{gaz2}(t)$. Gdy zawór jest otwarty, wszystkie jego odsłonięte powierzchnie

przejmują ciepło przy współczynniku $\alpha_1(t)$ ($= \alpha_2(t)$) od gazu o temperaturze $T_{gaz1}(t)$ ($= T_{gaz2}(t)$). Wymienione wielkości składają się na warunki brzegowe III rodzaju (Fouriera). Przebiegi $T_{gaz}(t)$ i $\alpha(t)$ w modelowym cyklu roboczym silnika mogą być dowolnie kształtowane.



Rys. 1. Modele geometryczne dwóch „kwartek” zaworów A i B z grzybkami Ag i Bg, trzonkami At i Bt oraz oporami cieplnymi R_{GGA} , R_{TPA} , R_{GGB} i R_{TPB}
 Fig. 1. The geometrical models of two independent „quarters” of the valves A and B with the valve head Ag and Bg, the valves stem At and Bt, and the contact thermal resistances R_{GGA} , R_{TPA} , R_{GGB} and R_{TPB}



Rys. 2. Przebiegi nadwyżek temperatury czynnika roboczego $T_{gaz1}(t)$ i $T_{gaz2}(t)$ oraz współczynników przejmowania ciepła $\alpha_1(t)$ i $\alpha_2(t)$ podczas założonego cyklu roboczego silnika
 Fig. 2. The temperature surplus of working medium $T_{gaz1}(t)$ and $T_{gaz2}(t)$ as well as the heat convection coefficients $\alpha_1(t)$ and $\alpha_2(t)$ during the engine work cycle

Przyjęte warunki brzegowe wymiany ciepła (zaznaczone odpowiednimi liniami nad powierzchniami zaworów, pokazanych na rys. 3) na powierzchniach zaworów powtarzają się zgodnie z cyklem roboczym silnika (rys. 2) i zmieniają się w zależności od położenia zaworów względem gniazd i prowadnic. Na rys. 3a,b pokazano rozmieszczenie podstawowych parametrów charakteryzujących zmienne w czasie warunki brzegowe w położeniach otwartych i zamkniętych zaworów.

Na rys. 3a pokazano rozmieszczenie warunków brzegowych na powierzchniach zaworów w położeniu otwartym; przyjęto:

- na czołach i przyłgniach grzybków, na ich stożkowych powierzchniach i odsłoniętych częściach trzonków zaworów – zmienne w czasie warunki brzegowe Fouriera, określone przebiegami $T_{gaz1}(t)$ i $\alpha_1(t)$ (por. rys. 2),
- na powierzchniach trzonków aktualnie kontaktujących się z prowadnicami – warunki brzegowe IV rodzaju z kontaktowymi oporami cieplnymi R_{TPA} i R_{TPB} oraz zmienną w czasie temperaturą prowadnic $T_{PR}(t)$,
- na końcach trzonków – warunki Dirichleta, określone zmienną temperaturą $T_{PR}(t)$,
- na płaszczyznach ograniczających wycinki zaworów (rys. 4), w tym także osie zaworów – warunki adiabatyczne (zerowy warunek Neumanna oznacza, że lokalne gęstości strumienia ciepła są równe zero).

W położeniu zamkniętym zaworów (rys. 3b) warunki brzegowe przyjmują następujące postacie:

- na czołach grzybków – zmienne w czasie warunki brzegowe Fouriera, nadal określone przebiegami $T_{gaz1}(t)$ i $\alpha_1(t)$,
- na przyłgniach grzybków – zmienne w czasie warunki brzegowe IV rodzaju z

kontaktowymi oporami cieplnymi R_{GGA} i R_{GGB} oraz zmienną w czasie temperaturą gniazd $T_{GN}(t)$,

- na stożkowych powierzchniach grzybków i odsłoniętych częściach trzonków – zmienne w czasie warunki brzegowe Fouriera, określone przebiegami $T_{gaz2}(t)$ i $\alpha_2(t)$ (por. rys. 2),
- na powierzchniach trzonków aktualnie kontaktujących się z przewodnicami – warunki brzegowe

IV rodzaju z kontaktowymi oporami cieplnymi R_{TPA} i R_{TPB} oraz zmienną w czasie temperaturą przewodnic $T_{PR}(t)$,

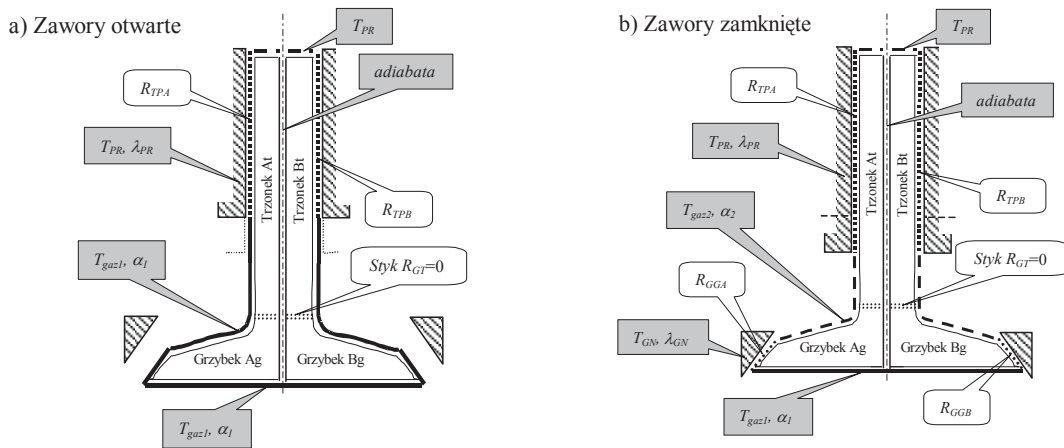
- na końcach trzonków – warunki Dirichleta, określone zmienną temperaturą $T_{PR}(t)$,
- na płaszczyznach ograniczających wycinki zaworów, w tym także osie zaworów – warunki adiabatyczne (takie jak dla stanu otwartego).

Temperatury obydwu gniazd T_{GN} i obydwu przewodnic T_{PR} zaworów są zadanymi, współzależnymi funkcjami czasu (ich wartości w funkcji miejsca, np. na całej powierzchni gniazda, są takie same) i zmieniają się wg zależności:

$$T_{GN} = T_{GNmax} \cdot [1 - \exp(-0,25 \cdot t)], \quad (2)$$

$$T_{PR} = 0,6 \cdot T_{GN} \cdot [1 - \exp(-0,125 \cdot t)]. \quad (3)$$

gdzie T_{GNmax} jest zadaną wartością maksymalnej temperatury gniazda (tu równą 350 K).



Rys. 3. Warunki brzegowe wymiany ciepła na powierzchniach modeli zaworów: a) w stanie otwartym, b) w stanie zamkniętym

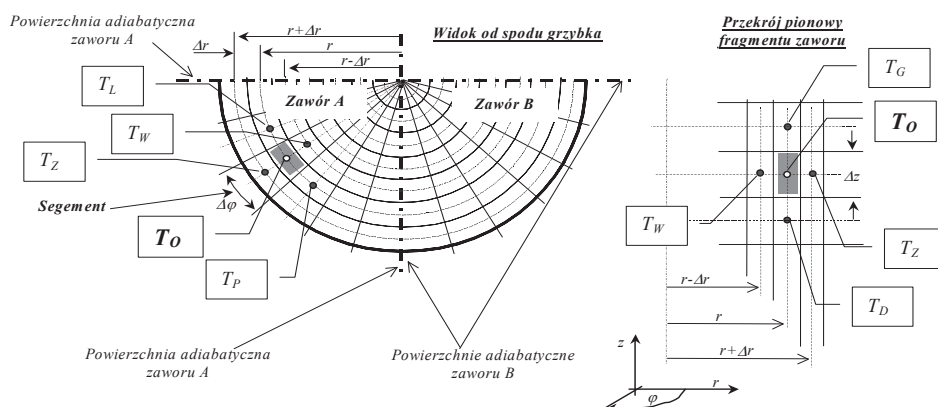
Fig. 3. The boundary conditions for heat transfer on the surface of valve models in the open (a) and close (b) state

Modele geometryczne wycinków zaworów osadzone w walcowo-symetrycznym układzie odniesienia o zmiennych: promieniu r , wysokości z i kącie φ . Na rys. 4 pokazano sposób dyskretyzacji zaworów wycinkami pierścieni o grubości $\Delta r = r_{i+1} - r_i$, wysokości Δz i kącie rozwarcia segmentu $\Delta\varphi$. Po pięć takich segmentów składa się na model geometryczny każdego wycinka zaworu (przy $\Delta\varphi = 18^\circ$ wycinek ma postać „ćwiartki” zaworu).

Trójwymiarowy element bilansowy (komórka przestrzenna – oznaczona kolorem szarym – rys. 4) o temperaturze T_O kontaktuje się z sześcioma komórkami: górną (G), dolną (D), wewnętrzną (W), zewnętrzną (Z), prawą (P) i lewą (L) o temperaturach odpowiednio: T_G , T_D , T_W , T_Z , T_P i T_L . Wymienione wielkości, znajdują się w węzłach, leżących w płaszczyznach symetrii osiowej segmentów, o kątach rozwarcia $\Delta\varphi$.

W modelach zaworów A i B (rys. 4) wykorzystano kilkadziesiąt rodzajów formuł, których postaci zależą od położenia komórki w modelu (formuły wewnętrzne lub brzegowe)

i rodzaju warunków wymiany ciepła na powierzchniach zaworów (warunki brzegowe Dirichleta, Neumanna, Fouriera i IV rodzaju).



Rys. 4. Dyskretyzacja „ćwiartek” zaworów A i B elementami o wymiarach Δr , Δz , $\Delta \varphi$ w układzie walcowym [5]

Fig. 4. Discretization of „quarters” of the valve A and B with the elements of dimension Δr , Δz , $\Delta \varphi$ in the cylindrical coordinate system [5]

Dla przykładu (rys. 4 i 5) pokazano zostanie sposób wyprowadzenia formuły brzegowej z warunkiem IV rodzaju z kontaktowym oporem cieplnym R_{GGA} między przyłgnią grzybka i gniazda zaworowego (przykłady wyprowadzeń różnych formuł znajdują się w opracowaniach [2,3,4], a innych formuł dla omawianego modelu – w [5]). Bilans nieustalonego strumienia ciepła dla narożnikowej komórki bilansowej T_O w materiale grzybka Ag ma postać

$$\begin{aligned} & \frac{\pi \cdot \Delta \varphi}{360} \left[\left(r + \frac{\Delta r}{2} \right)^2 - \left(r - \frac{\Delta r}{2} \right)^2 \right] \cdot \frac{(T_G^{GN} - T_O)}{\frac{\Delta z}{2\lambda_{GN}} + R_{GGA} + \frac{\Delta z}{2\lambda_{Ag}}} + \frac{\pi \cdot \Delta \varphi}{180} \left(r - \frac{\Delta r}{2} \right) \cdot \Delta z \cdot \lambda_{Ag} \frac{(T_W - T_O)}{\Delta r} + \Delta r \cdot \Delta z \cdot \lambda_{Ag} \frac{(T_L - T_O)}{\pi r \frac{\Delta \varphi}{180}} + \\ & + \frac{\pi \cdot \Delta \varphi}{360} \left[\left(r + \frac{\Delta r}{2} \right)^2 - \left(r - \frac{\Delta r}{2} \right)^2 \right] \cdot \lambda_{Ag} \frac{(T_D - T_O)}{\Delta z} + \frac{\pi \cdot \Delta \varphi}{180} \left(r + \frac{\Delta r}{2} \right) \cdot \Delta z \cdot \frac{(T_Z^{GN} - T_O)}{2\lambda_{GN} + R_{GGA} + \frac{\Delta r}{2\lambda_{Ag}}} + \Delta r \cdot \Delta z \cdot \lambda_{Ag} \frac{(T_P - T_O)}{\pi r \frac{\Delta \varphi}{180}} = \\ & = \frac{\pi \cdot \Delta \varphi}{360} \left[\left(r + \frac{\Delta r}{2} \right)^2 - \left(r - \frac{\Delta r}{2} \right)^2 \right] \cdot \Delta z \cdot c_p \rho \frac{(T_O^+ - T_O)}{\Delta t} \quad , \end{aligned} \quad (4)$$

gdzie: Δt – krok czasu, T_O^+ – temperatura komórki bilansowej T_O w bieżącej chwili t , a T_W , T_P , T_L , T_D i T_O – temperatury komórek w materiale grzybka Ag oraz T_G^{GN} i T_Z^{GN} w materiale gniazda GN w chwili $t - \Delta t$, a R_{GGA} jest kontaktowym oporem cieplnym na styku materiału grzybka Ag i gniazda GN.

Z równania (4) uzyskuje się brzegową formułę temperaturową T_O^+ dla komórki bilansowej „O”, należącej do materiału Ag, która dla dowolnej chwili t ma postać

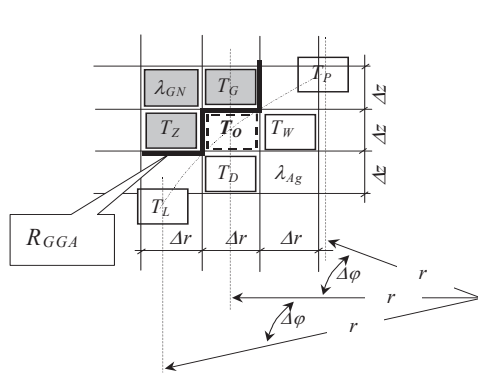
$$T_O^+ = T_O \left[1 - \Delta F_{O_r} \left(\frac{2}{m^2 \cdot R_m} + \frac{2n-1}{n} + \frac{1}{m^2} + \frac{2n+1}{n \cdot R_r} + \frac{2 \cdot K_k}{n^2} \right) \right] + \Delta F_{O_r} \left[\frac{2 \cdot T_G^{GN}}{m^2 \cdot R_m} + \frac{2n-1}{n} T_W + \frac{T_D}{m^2} + \frac{2n+1}{n \cdot R_r} T_Z^{GN} + \frac{K_k}{n^2} (T_P + T_L) \right], \quad (5)$$

gdzie: $\Delta F_{O_r} = \frac{a_{Ag} \cdot \Delta t}{(\Delta r)^2}$ – dyskretna liczba Fouriera (bezwymiarowy krok czasu), odniesiona do

cech termofizycznych materiału grzybka Ag oraz do wymiaru Δr ,

$R_m = 1 + \frac{2R_{GGA} \cdot \lambda_{Ag}}{m \cdot \Delta r} + \frac{\lambda_{Ag}}{\lambda_{GN}}$, $R_r = 1 + \frac{2R_{GGA} \cdot \lambda_{Ag}}{\Delta r} + \frac{\lambda_{Ag}}{\lambda_{GN}}$ – kierunkowe wyróżniki kontaktowego

oporu cieplnego materiałów gniazda GN i grzybka Ag zaworu A,



Rys. 5. Schemat bilansowy dla trójwymiarowej narożnikowej formuły temperaturowej w komórce "O" materiału Ag, z warunkiem IV rodzaju i oporem kontaktowym R_{GGA}

Fig. 5. The balance schema for the corner temperature in the "O" cell of the Ag material with the kind condition and the contact resistance R_{GGA}

$$K_k = \frac{360 \cdot 180}{(\pi \cdot \Delta\varphi)^2}, \quad m = \frac{\Delta z}{\Delta r}, \quad n = \frac{r}{\Delta r} -$$

współczynniki kształtu.

Dla zadanych wartości Δr , Δz i $\Delta\varphi$ współczynniki K_k , R_m , R_r i m są stałymi parametrami, natomiast współczynnik n jest funkcją bieżącego położenia komórki, zależnego od promienia r . Na rys. 5, kolorem szarym zaznaczono komórki materiału gniazda GN, a białym - komórki materiału grzybka Ag. Formuła (5) stanowi przykład formuł wykorzystywanych w modelu obliczeniowym, zbudowanym w środowisku MS Excel [4]. Model obliczeniowy składa się z 5. arkuszy z formułami (typu F) oraz 7. arkuszy z wartościami brzegowymi i bieżącymi

(typu W). W każdym z pięciu arkuszy F, które reprezentują przekroje osiowe segmentów zaworów A i B dla dyskretnych wartości kąta φ , znajduje się blisko 55. typów formuł. W modelu, liczba komórek z formułami dochodzi do 4000., a łącznie z komórkami przechowującymi wartości w arkuszach typu W, sięga ok. 10000. Każdy model poddano 60000 iteracji, co odpowiada początkowym 1500. cyklom pracy (w przedziale czasu 0 – 1 min.) silnika czterosuwowego przy prędkości obrotowej 3000 obr/min. Proces obliczeń nadzorowało tzw. makro, które składa się z kilkunastu prostych poleceń, sterujących przepływem i wymianą danych międzyiteracyjnymi.

3. Badania symulacyjne modeli zaworów z grzybkami płaskimi

W badaniach wpływu jakości kontaktów cieplnych grzybek - gniazdo oraz trzonek - prowadnica (przy określonych zależnościach (2) i (3) przebiegach temperatury gniazda i prowadnicy) na stan cieplny zaworów, wykorzystano dane wejściowe, przedstawione w tablicy 1 oraz wariantowe kombinacje wartości kontaktowych oporów cieplnych grzybek – gniazdo R_{GG} i trzonek – prowadnica R_{TP} , podane w tablicy 2.

Na rys. 6 pokazano przykłady chwilowych pól temperatury, dla przypadków: idealnych kontaktów cieplnych między grzybkiem i gniazdem oraz trzonkiem i prowadnicą zaworu A ($R_{GGA} = R_{TPA} = 0,000 \text{ m}^2\text{K/W}$) oraz nieidealnych kontaktów między tymi elementami zaworu B ($R_{GGB} = R_{TPB} = 0,001 \text{ m}^2\text{K/W}$). Na wykresach, oprócz informacji o wartościach współczynników przewodzenia ciepła, podano także bieżącą temperaturę gniazda T_{GN} i prowadnic T_{PR} .

Porównanie pól temperatury wykazuje istotne różnice w przepływie ciepła w tych zaworach, zależne od jakości styku powierzchni grzybek – gniazdo i trzonek – prowadnica zaworowa. W zaworze zaworu B, w porównaniu z zaworem A (o idealnych kontaktach cieplnych), nieidealne kontakty cieplne między tymi powierzchniami przyczyniają się do znacznego podwyższenia średniej temperatury zaworu, zwiększenia gradientów temperatury, szczególnie w grzybkowej części zaworu, i zmiany kierunku przepływu ciepła na bardziej „pionowy”. Widać, że nawet niewielkie wartości kontaktowych oporów cieplnych (np. $R = 0,001 \text{ m}^2\text{K/W}$) tworzą warstwy dobrej izolacji cieplnej, ograniczające funkcje chłodzące gniazda i prowadnic.

Tablica 1. Dane wejściowe w modelach symulacyjnych zaworów A i B (wielkości wejściowe zadawane w modelach wyróżniono wytłuszczonym drukiem)

Table 1. Input data in models of stimulatory valves A and B (output data given in models one distinguished in bold characters)

Lp.	Wielkość wejściowa	Miano	Elementy modelu obliczeniowego:					
			Grzybek <i>Ag</i>	Trzonek <i>At</i>	Grzybek <i>Bg</i>	Trzonek <i>Bt</i>	Gniazdo <i>GN</i>	Prowadnica <i>PR</i>
1.	Współczynnik przewodzenia ciepła	λ [W/(m K)]	20	30	20	30	60	60
2.	Gęstość	ρ [kg/m ³]	7800				-	-
3.	Ciepło właściwe	c_p [J/(kg K)]	480				-	-
4.	Współ. wyrównywania temperatury	a [m ² /s]	0,0000053	0,0000107	0,0000027	0,0000080	-	-
5.	Dyskretny przyrost promienia	Δr [m]	0,001					
6.	Dyskretna wysokość	Δz [m]	0,002					
7.	Dyskretny kąt segmentu	$\Delta\varphi$ [°]	18					
			Krok czasu modelu:					
8.	Czas jednego cyklu roboczego	t_{CY} [s]	0,04 (przy 3000 obr/min)					
9.	Krok czasu modelu	Δt [s]	0,001					
			Warunki graniczne wymiany ciepła cyklu roboczym:					
			<i>Ssanie</i>	<i>Sprężanie</i>	<i>Rozprężanie</i>	<i>Wydech</i>		
10.	Nadwyżka temp. gazu (rys. 2)	T_{gaz1} [K]	150 do 150	150 do 800	2700 do 1000	1000 do 600		
11.	Współ. przejm. ciepła <i>alfa1</i> (rys. 2)	α_1 [W/(m ² K)]	300	600	3000	1000		
12.	Nadwyżka temp. gazu (rys. 2)	T_{gaz2} [K]	600	600	600	1000 do 600		
13.	Współ. przejm. ciepła <i>alfa2</i> (rys. 2)	α_2 [W/(m ² K)]	500	500	500	1000		
14.	Nadwyżka temperatury gniazda	T_{GN} [K]	$T_{GN} = T_{GNmax} [1 - \exp(-0,25 t)]$ dla $T_{GNmax} = 350$ K wg wzoru (2)					
15.	Nadwyżka temperatury prowadnicy	T_{PR} [K]	$T_{PR} = 0,6 T_{GN} [1 - \exp(-0,125 t)]$ wg wzoru (3)					
16.	Nadwyżka temperatury początkowej	T_{pocz} [K]	0 w całej objętości zaworu					

Tablica 2. Zestawienie kombinacji wartości kontaktowych oporów cieplnych R_{GG} i R_{TP} , wykorzystywanych w obliczeniach symulacyjnych modeli zaworów

Table 2. The list of the combination of the contact value of -thermal resistances R_{GG} and R_{TP} , used in calculations of stimulatory models of valves

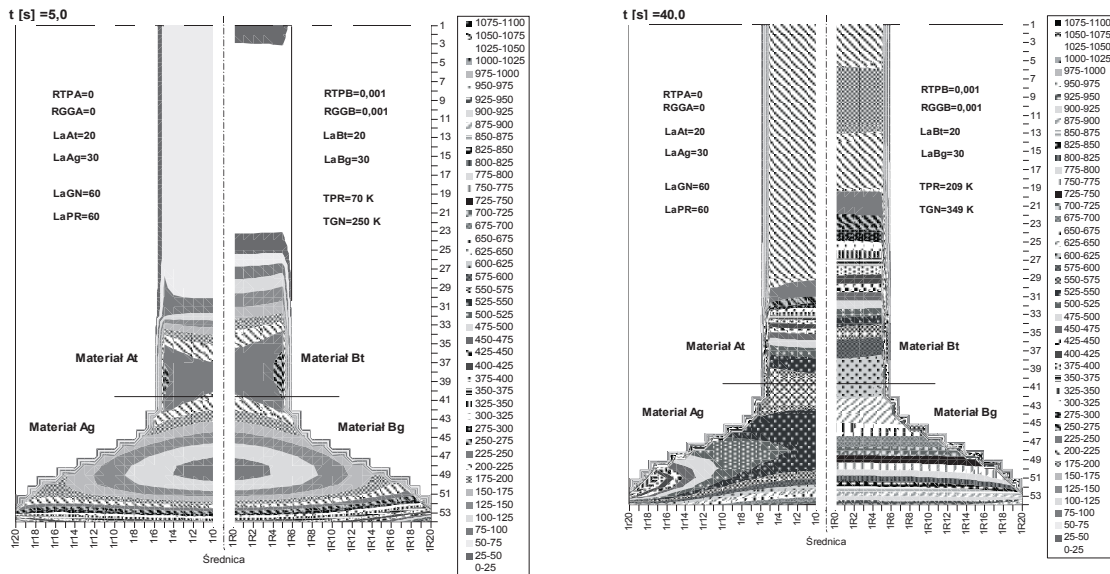
Kontaktowe opory cieplne: [m ² K/W]	grzybek – gniazdo: R_{GG}					
trzonek – prowadnica: R_{TP}	0,00000	0,00002	0,00005	0,0001	0,0005	0,001
0,00000	x	x	x	x	x	x
0,00005	x	-	-	x	-	x
0,0001	x	-	-	x	-	x
0,001	x	-	-	x	-	x

4. Analiza pól temperatury w zaworach

Celem badań symulacyjnych jest ocena wpływu jakości kontaktów cieplnych oraz przebiegów temperatury gniazda i prowadnicy na rozkład pól temperatury w modelach zaworów, podczas „zimnego” rozruchu silnika. Dla potrzeb analizy wybrano 5 punktów obserwacji temperatury (po 3 w każdym grzybku i po 2 w każdym trzonku). Na rys. 7 pokazano rozmieszczenie punktów obserwacji temperatury w grzybkach G1 do G3 oraz w trzonkach zaworów T4 i T5.

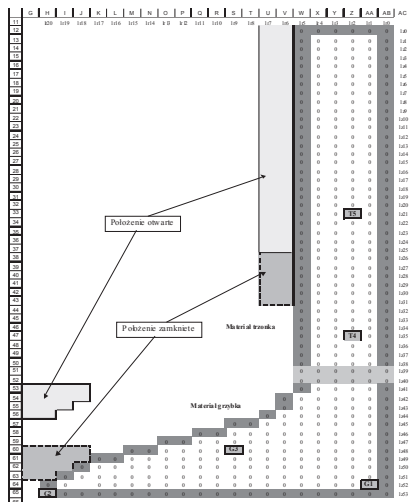
Wyniki tych obserwacji, dla kilkunastu kombinacji wartości kontaktowych oporów cieplnych, posłużyły do wyznaczenia przebiegów nadwyżek temperatury w wybranych punktach przekrojów zaworów, dla czterech kombinacji wartości kontaktowych oporów cieplnych R_{GG} i R_{TP} . Przebiegi nadwyżek temperatury, pokazane na rys. 8a, odpowiadają przypadkom:

- idealnych kontaktów cieplnych grzybek – gniazdo oraz trzonek – prowadnica (kombinacja oporów RGG000-TP000),
- nieidealnych kontaktów cieplnych między ww. elementami (kombinacja oporów RGG001-RTP001).



Rys. 6. Porównanie chwilowych pól temperatury ($t = 5$ i 40 s) w półprzekrojach identycznych zaworów A i B, różniących się jakością kontaktów cieplnych: grzybek – gniazdo i trzonek – prowadnica (zawór A ma idealne kontakty cieplne: $R_{GGA} = R_{TPA} = 0,000 \text{ m}^2\text{K/W}$, a zawór B – nieidealne kontakty cieplne: $R_{GGB} = R_{TPB} = 0,001 \text{ m}^2\text{K/W}$), przy temperaturach gniazda T_{GN} i prowadnicy T_{PR} , określonych wzorami (2) i (3)

Fig. 6. The comparison of temporal temperature fields ($t = 5$ i 40 s) in the half-cross-sections of valve A and B for a different quality of thermal contact between the valve head and valve seat, and between the valve stem and valve guide, when the temperature of valve seat is T_{GN} and the temperature of valve guide is T_{PR} . The temperature of valve seat and valve guide are determined using the equation (2) and (3). The valve A has the ideal thermal contact: $R_{GGA} = R_{TPA} = 0 \text{ m}^2\text{K/W}$, and the valve B has the non-ideal thermal contact: $R_{GGB} = R_{TPB} = 0,001 \text{ m}^2\text{K/W}$



Rys. 7. Dyskretna struktura przekroju zaworu z punktami obserwacji temperatury: G1 do G3 w grzybku oraz T4 i T5 w trzonku

Fig. 7. The discrete structure of valve cross-section with the points G1-G3 in the valve head, and T4-T5 in the valve stem, used for the observation of temperature

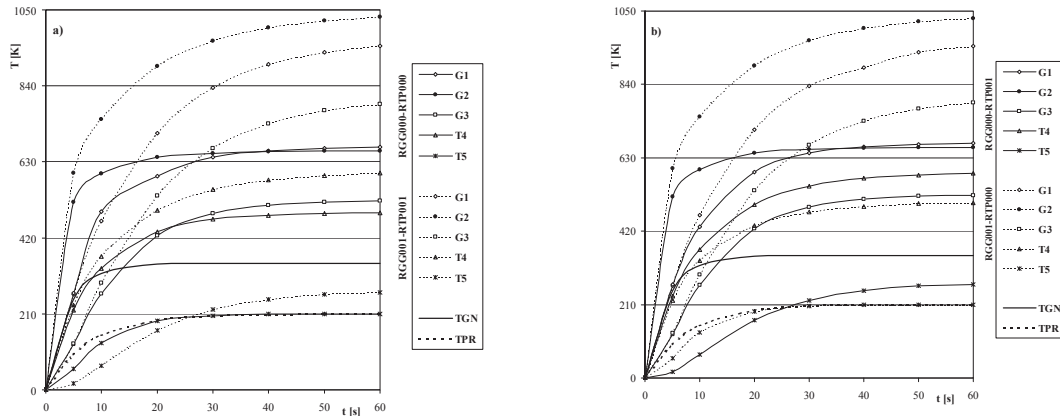
cieplnemu trzonek – prowadnica (kombinacja oporów RGG001-RTP000).

Nadwyżka temperatury gniazda T_{GN} oraz prowadnicy T_{PR} dla omawianych przypadków, zmieniała się wg funkcji (2) i (3), które gwarantują stabilizację temperatury gniazda po ok. 20 s, a prowadnicy po ok. 30 s. Przebiegi T_{GN} i T_{PR} naniesiono na wykresach.

W przypadku idealnych kontaktów cieplnych (RGG000-RTP000, linie ciągłe na rys. 8a) stabilizacja temperatury w zaworze następuje po ok. 40 s, a w przypadku kontaktów nieidealnych (RGG001-RTP001, linia przerywana na rys. 8a) - po ponad 60 s. Można więc przyjąć, że dla modelowych warunków wymiany ciepła stabilizacja temperatury w zaworze następuje po czasie 2-krotnie większym, niż stabilizacja temperatury gniazda oraz prowadnicy.

Temperatura (np. średnia) zaworu w funkcji czasu bardzo wyraźnie zależy od jakości omawianych kontaktów cieplnych. Potwierdzają

na rys. 8a. W osi zaworu (przebiegi w punktach G1) nadwyżka temperatury, w przypadku kontaktów nieidealnych jest o ok. 40% większa (670 i 950 K), niż dla kontaktów idealnych, natomiast w pobliżu krawędzi talerzyka (przebiegi w punktach G2) nieidealne kontakty cieplne powodują wzrost temperatury o prawie 60% (660 i 1030 K). Po stabilizacji nadwyżki temperatury gniazda $T_{GN} = 350$ K, różnica temperatury między grzybkiem (punkt G2) a gniazdem, przy nieidealnych kontaktach cieplnych, sięga prawie 700 K i ponad 300 K – przy kontaktach idealnych.



Rys. 8. Porównanie przebiegów temperatury w punktach obserwacyjnych G1, G2, G3, T4 i T5 (dla danych z a) parami idealnych (kombinacja RGG000-RTP000) lub nieidealnych (kombinacja RGG001-RTP001) kontaktów cieplnych: grzybek – gniazdo oraz trzonek – prowadnica, b) mieszanych, idealnych i nieidealnych kontaktów cieplnych: grzybek – gniazdo i trzonek – prowadnica (kombinacja RGG001-RTP000 i kombinacja RGG000-RTP001)

Fig. 8. The comparison of the temperature transient in the observation points G1, G2, G3, T4, and T5 (for the data in Table 1 and 2) for the following situations: a) the thermal contacts are mutually ideal (RGG000-RTP000) or non-ideal (RGG001-RTP001) between the valve head and valve seat, and between the valve stem and valve guide, b) the thermal contacts are mixed (ideal/non-ideal) between the valve head and valve seat, and between the valve stem and valve guide (case RGG001-RTP000 and RGG000-RTP001)

Przebiegi temperatury, pokazane na rys. 8b, dają odpowiedź na pytanie, jaki jest wpływ każdego z kontaktów cieplnych: grzybek – gniazdo oraz trzonek – prowadnica na przebiegi i rozkład temperatury w zaworze. Na rys. 8a i 8b widoczne jest duże podobieństwo przebiegów nadwyżek temperatury w zaworach o różnej jakości kontaktów cieplnych. Przebiegi oznaczone liniami ciągłymi na obydwu wykresach, odpowiadające kombinacjom RGG000-RTP000 i RGG000-RTP001, pozwalają porównać zawór z idealnymi kontaktami cieplnymi grzybek – gniazdo i trzonek – prowadnica, z zaworem o idealnym kontakcie grzybek – gniazdo i o nieidealnym kontakcie trzonek – prowadnica. Podobieństwo przebiegów temperatury w zaworach o idealnym kontakcie cieplnym grzybek – gniazdo i różnych kontaktach cieplnych trzonek – prowadnica pozwala wnioskować, że o polu temperatury w grzybku decyduje kontakt cieplny grzybek – gniazdo (wynika stąd, że jakość kontaktu cieplnego trzonek – prowadnica ma niewielki wpływ na pole temperatury w grzybku zaworu). To spostrzeżenie potwierdza także podobieństwo przebiegów temperatury dla nieidealnego kontaktu cieplnego grzybek – gniazdo (kombinacja RGG001-RTP001, linie przerywane na rys. 8a) i idealnego kontaktu trzonek – prowadnica (kombinacja RGG001-RTP000, linie przerywane na rys. 8b).

Największe tempo przyrostu temperatury i największe nadwyżki temperatury w zaworze są obserwowane w początkowej fazie „zimnego” rozruchu silnika, na krawędzi grzybka, przy nieidealnym kontakcie cieplnym grzybek – gniazdo. Zmiana kontaktu cieplnego trzonek – prowadnica w zakresie kontakt idealny – nieidealny wywołuje w części trzonkowej zaworu

przewodnica w zakresie kontakt idealny – nieidealny wywołuje w części trzonkowej zaworu (T_4 i T_5), różnice temperatury mniejsze od 100 K.

5. Podsumowanie

Przedstawiono fragment badań symulacyjnych stanu cieplnego zaworów wylotowych podczas „zimnego” rozruchu silnika. Celem tych badań było poznanie wpływu jakości kontaktowych oporów cieplnych par: grzybek – gniazdo i trzonek – przewodnica na stan cieplny zaworu. Trójwymiarowy model nieustalonego przewodzenia i wymiany ciepła w półprzekrojach dwóch zaworów osadzonych w walcowym układzie odniesienia, pozwala na bezpośrednie porównywanie pól temperatury, przy różnych wartościach wielkości wejściowych. Modele zaworów, zbudowane metodą KM3R [4] w środowisku MS Excel, pozwalają:

- zadawać własności termofizyczne materiałów grzybków, trzonek, gniazda i przewodnicy,
- zadawać cyklicznie zmienne warunki wymiany ciepła na powierzchniach zaworów, zależne od parametrów ładunku roboczego w cyklu roboczym oraz położenia zaworów względem gniazd i przewodnic,
- zadawać wartości oporów cieplnych par: grzybek – gniazdo i trzonek – przewodnica.

Opis modelu, przedstawionego pełniej w referacie [5], ograniczono do opisu modyfikacji, związanej z wprowadzeniem warunków brzegowych IV rodzaju.

Badania symulacyjne wpływu jakości kontaktów cieplnych na przepływ ciepła w zaworach wylotowych podczas „zimnego” rozruchu silnika wykazały istotną zależność jakości omawianych kontaktów na pole temperatury w zaworach. Szczególny wpływ na to pole ma jakość kontaktu cieplnego grzybek – gniazdo.

Jednym z celów tej publikacji jest także popularyzacja iteracyjnej metody KM3R [4] w zastosowaniu do budowy modeli zjawisk fizycznych w obiektach technicznych. Aplikacja jej do zbudowania i rozwiązania dość złożonego modelu symulacyjnego przepływu ciepła w zaworach, służy m. in. pokazaniu możliwości oraz walorów metody. Powszechny dostęp do arkuszy kalkulacyjnych w oprogramowaniu PC oraz szybkość i łatwość budowania modeli, preferuje metodę KM3R przede wszystkim do wykorzystania w nauczaniu modelowania różnych zjawisk fizycznych (nie tylko wymiany ciepła) w zagadnieniach inżynierskich.

Literatura

- [1] Wisniewski S., „Obciążenia cieplne silników tłokowych”. WKiŁ, 1972.
- [2] Nagórski Z., „Metoda KM3R w zastosowaniu do obliczeń stanu cieplnego elementów silników spalinowych” (cz. I). Problemy Eksploatacji - Zeszyty Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji, nr 2(25), str. 195-214, Radom, 1997.
- [3] Nagórski Z., „Modelowanie przepływu ciepła w elementach silników spalinowych”. Teza Komisji Naukowo-Problemovej Motoryzacji PAN o/Kraków, zeszyt 21, Kraków, 2000 r., str. 347-356 (Materiały Konferencji Konmot-Autoprogress'2000, Politechnika Krakowska, Zakopane), październik 2000.
- [4] Nagórski Z., Modelowanie przewodzenia ciepła za pomocą arkusza kalkulacyjnego, MRS + Excel = KM3R (ISBN 83-7207-226-4). Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, str. 224, 2001.
- [5] Nagórski Z., „Modelowanie trójwymiarowej nieustalonej wymiany ciepła w zaworach silników tłokowych metodą KM3R”. Referat przyjęty na Kongres PTNSS'2005 pod nr P05-C067, Szczyrk, 25-27.09.2005.