Jan FILIPCZYK

NUMERYCZNA ANALIZA TEMPERATUR W DENKU TŁOKA Z CERAMICZNĄ WARSTWĄ OCHRONNĄ

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań symulacyjnych pola temperatur w denku tłoka z ceramiczną warstwą ochronną. Do obliczeń zastosowano metodę elementów skończonych. Wyniki obliczeń porównano z wynikami badań eksperymentalnych.

NUMERICAL ANALYSIS OF TEMPERATUR IN THE PISTON CROWN WITH CERAMIC PROTECTIVE LAYER

Summary. Simulation test results of temperature charts occured in the piston crown with ceramic protective layer have been presented in the paper. Application of the Boundary Elements Method (BEM) in the numerical analysis has been presented in the paper.

1. WPROWADZENIE

Celem przeprowadzonych badań modelowych było określenie wpływu naniesionych na denko tłoka ochronnych powłok ceramicznych rozkładu temperatur w górnej części tłoka. Obliczenia wykonano za pomocą systemu COSMOS/M.

Problematyka obciążeń cieplnych elementów silników spalinowych nastręcza wielu problemów z powodu niedoskonałości metod i narzędzi obliczeniowych. Dla układów złożonych, zarówno co do kształtu, właściwości, jak i warunków brzegowo-początkowych, możliwe jest wyznaczenie jedynie rozwiązań przybliżonych, otrzymanych dzięki zastosowaniu metod numerycznych. Złożony układ ciągły zastępowany jest układem dyskretnym o skończonej liczbie punktów (węzłów). Ponadto, przyjmuje się funkcje interpolacyjne (funkcje kształtu), opisujące zmienność układu pomiędzy węzłami. Kolejnym etapem jest zbudowanie dyskretnego modelu obliczeniowego.

W rozwiązywaniu zadań przewodnictwa cieplnego za podstawowe niewiadome przyjmuje się wartości temperatur w węzłach. W metodzie elementów skończonych wielkości węzłowe są stopniami swobody funkcji aproksymujących pole temperatur w elemencie i ich wartości są wyznaczane z minimalizacji odpowiednich funkcjonałów.

2. MODEL GEOMETRII TŁOKA

Do badań modelowych wykorzystano tłok silnika PERKINS. Na bazie jego wymiarów rzeczywistych stworzono model zamieszczony na rysunku 1. W modelu tym zrezygnowano z odwzorowania osadzenia sworznia tłokowego, gdyż założono, że nie ma ono wpływu na rozkład temperatury w denku tłoka.



Rys. 1. Model tłoka silnika PERKINS bez osadzenia sworznia tłokowego Fig. 1. The piston model of PERKINS engine without piston pin boss

Przestrzenny model tłoka przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Przestrzenny model tłoka Fig. 2. The 3-d piston model

3. OKREŚLENIE WARUNKÓW BRZEGOWYCH

Ze względu na trudności związane z określeniem zmian temperatury czynnika roboczego T i współczynnika przejmowania ciepła α_g w komorze spalania dla konkretnego silnika w pracy przyjęto odpowiednie wartości T i α_g podane w literaturze [1, 3, 6, 7]. Wyznaczono i porównano rozkład temperatur w modelu tłoka z powłoką ceramiczną na denku i bez tej powłoki dla porównywalnych warunków pracy, w związku z czym przyjęte wartości T i α_g nie miały wpływu na różnicę rozkładu temperatur w modelach tłoków.

Warunki brzegowe w postaci powierzchni wymiany ciepła przedstawiono na rysunku 3, a odpowiadające im przyjęte wartości T_i i α_i zamieszczono w tablicy 1.

Dla modelu tłoka wykonanego ze stopu AK 12 (AlSi12CuMgNi) o przewodności cieplnej 166 [W/m·K] wykonano przykładowy rozkład temperatur przedstawiony na rysunku 4.



Rys. 3. Szkic powierzchni wymiany ciepła modelu tłoka Fig. 3. The scheme of surface heat conversion in the piston model

Nr powierzchni	$\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$	T _i [K]
1	303	1152
2	80	922
3	4200	463
4	0	550
5	3200	463
6	101	613
7	2000	457
8	0	525
9	6000	457
10	101	636
11	2000	457
12	0	525
13	6000	457
14	101	636

 $Tablica \ 1 \\ Wartości \ \alpha_i \ i \ T_i \ dla \ powierzchni \ modelu$







Rys. 4. Mapa temperatur w modelu tłoka bez powłoki ceramicznej

Fig. 4. Temperature chart occured in the piston model without ceramic protective layer

4. WYNIKI OBLICZEŃ

Wartości przyjętej do obliczeń przewodności cieplnej dla materiałów zestawiono w tablicy 2.

Przewodność cieplna dla materiałów ceramicznych zależy bardzo silnie od metody, jaką wykonano powłokę, i tak np. dla ZrO₂ waha się od 1.7 do 3.5 [W/m·K] dla Al₂O₃ rozrzut wartości jest znacznie większy i należy do przedziału od 3 do 30 [W/m·K]. Górne wartości przewodności cieplnej Al₂O₃ dotyczą materiału czystego o dużym stopniu zagęszczenia, o małej porowatości, natomiast dolne wartości dotyczą powłok nanoszonych między innymi takimi metodami, jak LPPS, APS czy EBPVD. Metody te charakteryzuje duża porowatość powstałych powłok z Al₂O₃, co znacznie zmniejsza przewodność cieplną [2, 3, 4, 5].

Lp.	Materiał	Przewodność cieplna $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$
1	AK 12	166
2	ZrO ₂	2.5
3	Al ₂ O ₃	4

Tablica 2 Przewodność cieplna wybranych materiałów

Obliczenia przeprowadzono dla powłok o grubościach 0,13 i 0,50 mm.

Na rysunkach 5...8 przedstawiono obliczone rozkłady temperatur z naniesionymi powłokami ochronnymi o grubościach 0,13 i 0,50 mm przy temperaturze czynnika roboczego 1152 K.





Zastosowanie powłok ceramicznych wykonanych z materiału o przewodności cieplnej znacznie mniejszej od przewodności cieplnej stopu AK 12 tłoka spowodowało zwiększenie izolacji termicznej komory spalania, przez co podniosło temperaturę bezpośrednio na powierzchni powłoki. Wzrost temperatury jest zależny proporcjonalnie od grubości powłoki, im grubsza powłoka, tym wyższa temperatura na powłoce.

Analizując rozkład temperatury w głąb tłoka zauważono, że zastosowanie powłoki obniża temperaturę części pierścieniowej, przez co może poprawiać warunki pracy i smarowania.

Większą izolację wykazała powłoka z ZrO₂, natomiast powłoka Al₂O₃ w mniejszym stopniu podwyższała temperaturę na powierzchni.



Rys. 6. Mapa temperatur w tłoku z powłoką Al₂O₃ o grubości powłoki 0.50 mm Fig. 6. Temperature charts occured in the piston with Al₂O₃ layer, thickness of layer 0,50 mm



Rys. 7. Rozkład temperatury w tłoku z powłoką ZrO₂ o grubości powłoki 0.13 mm Fig. 7. Temperature charts occured in the piston with ZrO₂ layer, thickness of layer 0,13 mm



Rys. 8. Rozkład temperatury w tłoku z powłoką ZrO₂ o grubości powłoki 0.50 mm
Fig. 8. Temperature charts occured in the piston with ZrO₂ layer, thickness of layer 0,50 mm

Dla oszacowania błędu, jaki popełniono modelując mapę temperatur metodą elementów skończonych przy wykorzystaniu systemu COSMOS/M, obliczono rozkłady temperatur w rzeczywistych próbkach z naniesionymi powłokami ceramicznymi z Al_2O_3 i ZrO_2 i porównano te obliczenia z wynikami badań stanowiskowych [8]. Materiałem bazowym próbek był stop aluminium AK 12, a warstwa wiążąca to modyfikowane AlNi. Parametry geometryczne próbek przedstawiono w tablicy 3.

Tablica 3

Nr	Materiał	Średnica próbki	Wysokość próbki	Grubość warstwy	Grubość
próbki	powłoki	bazowej [mm]	bazowej [mm]	wiążącej AlNi [mm]	powłoki [mm]
1	Al ₂ O ₃	56	8	0.11+0.15	0.28
2	ZrO ₂	62	8	0.07+0.10	0.35+0.36

Parametry geometryczne próbek

Odwzorowano geometrię w systemie COSMOS/M, zaliczając grubość warstwy wiążącej do grubości próbki bazowej i nie przypisując jej odrębnej przewodności cieplnej, przez co grubość próbki bazowej wzrosła w obliczeniach z 8 do 8.1 mm dla każdej próbki. Przyjęta przewodność cieplna próbki bazowej to 166 [W/m·K], a powłok odpowiednio: $Al_2O_3 - 4$ [W/m·K], ZrO₂ – 2.5 [W/m·K]. Próbka w badaniach stanowiskowych była naprzemiennie ogrzewana płomieniem palnika i chłodzona powietrzem. Temperatura płomienia to ok. 1525 K, a powietrza ok. 295 K. Odwzorowując warunki otoczenia, zadano warunki brzegowe i wygenerowano wyniki w postaci rozkładu temperatur w połowie przekroju obydwu próbek, co przedstawiają rysunki 9 i 10.



Rys. 10. Obliczony rozkład temperatury w próbce 2 Fig. 10. Temperature chart in sample number 2

Porównanie temperatur obliczonych i zmierzonych dla próbek przedstawia tablica 4.

Tablica 4

Temperatury obliczone i zmierzone o	dla badanych próbek
-------------------------------------	---------------------

Nr Materiał		Temperatura na powierzchni powłoki [K]		Temperatura na dnie próbki [K]	
prooki	powioki	Zmierzona	Obliczona	Obliczona	Obliczona
1	Al ₂ O ₃	738.15	747.23	583.15	600.13
2	ZrO ₂	738.15	752.72	563.15	557,95

Różnica temperatur zmierzonej i obliczonej dla próbek nie przekracza 17 K dla próbki z powłoką z Al₂O₃ i 15 K dla próbki z powłoką ZrO₂. Odchylenie temperatury obliczonej od zmierzonej może być spowodowane m.in. brakiem dokładnych danych o przewodności cieplnej materiałów wykorzystanych w badaniach stanowiskowych (szczególnie dla powłoki Al₂O₃, dla której rozrzut wartości jest duży i zależny od metody naniesienia powłoki), pominięciem w obliczeniach przewodności cieplnej warstwy wiążącej lub niedokładnym odwzorowaniem warunków brzegowych w postaci temperatury i współczynnika przewodzenia ciepła.

Stwierdzono zadowalające przybliżenie obliczeń przy wykorzystaniu systemu COSMOS/M z badaniami rzeczywistymi.

5. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń oraz analizy wyników stwierdzono:

- system COSMOS/M umożliwia modelowanie rozkładu temperatur w częściach silnika pokrytych różnego rodzaju powłokami, a uzyskane rozkłady temperatur obarczone są błędem zależnym od dokładności odwzorowania warunków brzegowych i dokładności zadanych stałych materiałowych;
- pokrycie powłokami ceramicznymi z Al₂O₃ i ZrO₂ ma wpływ na wartości temperatur w modelu tłoka w porównaniu z modelem tłoka bez powłoki;
- powłoka ZrO₂ ma większe zdolności do izolacji cieplnej od powłoki Al₂O₃, co wytłumaczyć można mniejszą przewodnością ZrO₂;
- wraz ze wzrostem grubości powłoki ceramicznej temperatura na powierzchni modelu rosła znacząco, natomiast w dolnej części modelu tłoka temperatura zwiększała się nieznacznie;
- dla najcieńszych powłok o grubości 0.13 mm zauważono najmniejszy wzrost temperatury na powierzchni powłoki, co, jak można przypuszczać, w najmniejszym stopniu zaburzy proces spalania;
- temperatura części pierścieniowej spadała wraz ze wzrostem grubości powłoki ceramicznej, a największe spadki zauważono dla powłoki ZrO₂;
- stwierdzono zadawalające przybliżenie wyników obliczeń przy wykorzystaniu systemu COSMOS/M z wynikami badań stanowiskowych próbek z powłokami ceramicznymi,
- zauważono, że odchylenie temperatury obliczonej od zmierzonej może być spowodowane: brakiem dokładnych danych o przewodności cieplnej materiałów wykorzystanych w badaniach stanowiskowych (szczególnie dla powłoki Al₂O₃, dla której rozrzut wartości jest duży i zależny od metody naniesienia powłoki), pominięciem w obliczeniach przewodności cieplnej warstwy wiążącej lub niedokładnym odwzorowaniem warunków brzegowych w postaci temperatury i współczynnika przewodzenia ciepła.

Literatura

- 1. Kwaśniowski S., Zabłocki W., Sroka Z.J.: Modelowanie obciążeń cieplnych w elementach silników spalinowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1999.
- Kobylańska-Szkaradek K.: Struktura i własności termofizyczne tlenkowych powłok ceramicznych otrzymywanych natryskiem plazmowym. Materiały z VII Seminarium Naukowego nt. Nowe technologie i materiały w metalurgii i inżynierii materiałowej, maj 1999, s. 43-51.
- 3. Jaskólski J.: Badanie pokryć ceramicznych tłoka metodą symulacji komputerowej. Journal of Kones'94, Vol. 1, No 1, Warsaw-Lublin 1994.
- 4. Mendera K.Z., Spyra A.: Influence of Thermal Barrier Coating on Heat Losses of Diesel Engine. Materiały konferencyjne KONES'97, Bielsko-Biała 1997.
- 5. Mendera K.Z.: Termoizolacja komory spalania. Silniki spalinowe w zastosowaniach wojskowych, WAT, Warszawa 1995.

- 6. Mruk A.: Badania oporu cieplnego warstw termoizolacyjnych nałożonych na denka tłoków na właściwości silnika spalinowego. PAN Oddział w Krakowie, Kraków 1995.
- 7. Mruk A.: Właściwości silnika z tłokami pokrytymi powłokami termoizolacyjnymi. Materiały konferencji KONMOT'94, Kraków – Raba Niżna 1994.
- Filipczyk J.: Perspektywy stosowania materiałów ceramicznych w tłokowych silnikach spalinowych. V sympozjum naukowo-techniczne "Silniki spalinowe w zastosowaniach wojskowych". Jurata, 17-19 października 2001, s. 223-230.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Bronisław Sendyka

Abstract

Simulation test results of temperature charts occured in the piston crown with ceramic protective layer have been presented in the paper. Application of the Boundary Elements Method (BEM) in the numerical analysis has been presented in the paper. The anallysis carried out has proved a qualitative conccurrence of the obtained results and possibility of practical applications of the model.