

## Zagadnienie przenikania fal ciepłych zespołu tłok-pierścienie tłokowe-tuleja cylindryczna (TPC)

*Streszczenie:* Na podstawie zjawisk powodujących zużycie elementów zespołu tłok-pierścienie tłokowe-tuleja cylindryczna zostały wybrane wrażliwe na uszkodzenia ciepłe elementy. Następnie została zaproponowana metoda monitorowania zmian maksymalnej amplitudy temperatury warstwy wierzchniej na podstawie której można identyfikować stan techniczny tych elementów. Polega ona na pomiarze głębokości rozchodzenia się fal termicznych za pomocą emisji akustycznej

Słowa kluczowe: *fala termiczna, maksymalna amplituda temperatury*

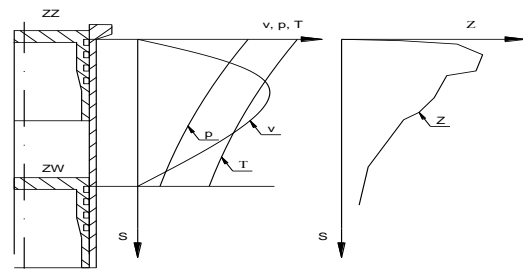
### 1. Wstęp

Ze względu na ciągłą tendencję do uzyskania w silnikach o ZS jak największej mocy jednostkowej dąży się m.in. do zwiększenia współczynnika napełnienia cylindra, nie zmieniając zasadniczych wymiarów geometrycznych zespołu TPC silnika. Wiąże się to ze zwiększeniem obciążeń mechanicznych spowodowanych głównie wzrostem oddziaływania ciśnienia gazów spalinowych i ciepłych powodujących wzrost temperatur części zespołu TPC otaczających komorę spalania.

Obciążenie cieplne komory spalania jest to ilość ciepła, którą należy doprowadzić w jednostce czasu do czynnika roboczego, aby w warunkach pracy silnika otrzymać te same zmiany temperatur, jakie osiąga się w wyniku spalania paliwa [11]. Wiąże się one bezpośrednio ze strumieniem ciepła przepływającym przez ścianki otaczające komorę spalania. Ponieważ ilość odprowadzonego ciepła zależy wyłącznie od warunków przenikania ciepła przez ścianki otaczające komorę spalania analiza ich zmian może służyć do identyfikacji stanu technicznego warstw wewnętrznych ścianek zespołu TPC. W pracy przedstawiona zostanie metoda służąca do monitorowania zmian maksymalnej różnicy temperatur w warstwach wewnętrznych, na podstawie których można przeanalizować zachowanie się ścianek przy zmiennym obciążeniu cieplnym.

### 2. Różne rodzaje zużycia elementów zespołu TPC

Większość przyczyn powodujących ograniczoną trwałość i niezawodność zespołu TPC leży w sferze zjawisk zachodzących w węzłach tarcia (np. pierścień tłokowy i tuleja cylindryczna rozdzielone olejem smarowym). Zjawiska te głównie powodują mechaniczne zużywanie się poprzez wzajemne oddziaływanie mikronierówności tych powierzchni. W powiązaniu z warunkami panującymi w cylindrze silnika pozwalają na scharakteryzowanie warunków tarcia, smarowania i zużycia zespołu TPC [10] (rys.1).



Rys.1. Przebiegi zależności prędkości, ciśnienia, temperatury i zużycia zespołu TPC [8] gdzie:  $v$  – prędkość tłoka;  $p$  – ciśnienie,  $T$  – temperatura powierzchni zewnętrznej,  $Z$  – zużycie,  $ZW$  – zwrot wewnętrzny,  $ZZ$  – zwrot zewnętrzny,  $S$  – położenie tłoka

Zmienna prędkość i kierunek ruchu tłoka pozwalają tylko w środkowym położeniu tłoka na smarowanie płynne. W okolicach zwrotnych położenia tłoka ( $ZW$  i  $ZZ$ ) nie ma możliwości na takie smarowanie. Ze względu na wyższy przebieg ciśnienia, temperatury i nacisków bardziej niekorzystne warunki pracy panują przy  $ZZ$  a zjawiska tam występujące mogą doprowadzić do tarcia suchego. Więc wszystkie elementy pracujące w okolicach  $ZZ$  są najbardziej wrażliwe na uszkodzenia.

Profil przebiegu zużycia tulei cylindrycznych lub pierwszego pierścienia tłoka wykazuje duże podobieństwo do przebiegu temperatury w funkcji położenia tłoka. W rejonie  $ZZ$  pola temperatur są największe, co wywołuje dodatkowy stan naprężeń w warstwach wierzchnich ( $WW$ ) tych elementów. Przy tarcu suchym w  $WW$  pierścienia i tulei cylindrycznej zakłócona zostaje naturalna budowa sieci krystalicznej, powodując przemiany strukturalne, będące przyczyną powstania nowego stanu naprężeń obu materiałów. Po odciążeniu tylko część atomów powraca do swojego pierwotnego położenia, natomiast reszta pozostaje w stanach przesuniętych, powodując zmiany naprężeń w materiale  $WW$  [4]. Wartość tych naprężeń będzie proporcjonalna do amplitudy zmian temperatury ścianki i może być wyznaczona z zależności [13]:

$$\sigma_{\vartheta_{sm}} = \frac{\alpha \cdot E \cdot \vartheta_{sm}}{1 - \nu} \quad (1)$$

gdzie:

- $\alpha$  - współczynnik rozszerzalności liniowej,
- $E$  - moduł sprężystości,
- $\vartheta_{sm}$  - maksymalna amplituda temperatury,
- $\nu$  - współczynnik Poissona.

Przykładowe wartości naprężeń dla różnych materiałów, z których wykonywane są ścianki komory spalania przedstawiono w tabeli 1 [1,13]. Dodatkowo w celu wyznaczenia wartości naprężeń przyjęta została propozycja W.S.Semenowa [9], że względna amplituda zmian temperatury powierzchni ścianek wolnoobrotowych silników wysokoprężnych wynosi ok.40÷50[K]

Tab.1. Wartości naprężeń dodatkowych

	$\alpha$ [1/deg]	$E$ [MPa]	$\nu$	$\sigma_{\vartheta_{sm}}$ [MPa]
Żeliwo	$10 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^5$	0,27	60÷75
Stopy aluminium	$24 \cdot 10^{-6}$	$0,7 \cdot 10^5$	0,34	100÷130
Stal	$11,5 \cdot 10^{-6}$	$2,1 \cdot 10^5$	0,3	140÷170

Z przedstawionych obliczeń wynika, że bardzo ważną wartością jest intensywność zmian temperatur  $\vartheta_{sm}$  na ściankach komory spalania w okolicach ZW. Ich nagłe zwiększenie spowodowane pracą silnika w stanie nieustalonym doprowadza do tego, że naprężenia będą miały charakter udarowy i może nastąpić pęknięcie np. pierwszego pierścienia. W związku z tym należy przeanalizować sposób kontrolowania nadwyżki temperatury na tych ściankach.

### 3. Przenikanie fal ciepłych

Obciążenia cieplne w zespole TPC zmieniają się periodycznie wytwarzając zmienne pola temperatur w ściankach. Głębokość, na której obserwuje się oddziaływanie wahań temperatury powierzchni jest niewielka, np.1,5mm [8], więc zagadnienie nieustalonego przewodzenia ciepła można rozpatrywać w układzie ograniczonym jedną powierzchnią.

Przy okresowych zmianach temperatury rozpatrywane będą nadwyżki temperatury  $\vartheta$  ponad średnią temperaturę powierzchni ścianki zespołu TPC w szeregu Fouriera tylko dla jednej harmonicznej [5, 12]:

$$\vartheta(t) = \vartheta_{sm} \cdot \cos \omega t \quad (2)$$

gdzie:  $\omega = 2\pi \cdot \nu$  - częstość kątowna zmian temperatury ( $\nu$ -częstotliwość zmian temperatury)

Następnie poprzez zastosowanie przekształcenia Laplace'a do równania różniczkowego jednowymiarowego nieustalonego przewodzenia ciepła

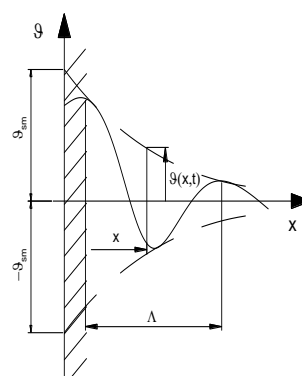
$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} \quad (3)$$

gdzie:  $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$  - dyfuzyjność cieplna ( $\lambda$ -współczynnik przewodzenia ciepła,  $\rho$  -gęstość,  $c_p$ -ciepło właściwe)

można ostatecznie otrzymać równanie określające zmianę nadwyżki temperatury w zależności od głębokości i czasu przenikania fali termicznej:

$$\vartheta(x, t) = \vartheta_{sc} \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2a}} \cdot x\right) \cdot \cos\left(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2a}} \cdot x\right) \quad (4)$$

Z równania (4) wynika, że temperatura wewnątrz ścianki np. tulei cylindrycznej zmienia się według funkcji cosinus (2) o odpowiednio zmniejszonej amplitudzie i z przesunięciem fazy (rys.2.)



Rys.2. Wykres zmian temperatury w tulei cylindrycznej przy zmianie temperatury powierzchni zewnętrznej, gdzie:  $\vartheta_{sm}$  - maksymalna amplituda temperatury,  $\vartheta_{xm}$  - amplituda zmian temperatury w odległości  $x$  od powierzchni zewnętrznej;  $\Lambda$  - długość fali temperaturowej [12]

Z powyższych równań (2 i 4) można wyznaczyć:

-Głębokość przenikania fal temperaturowych:  $x = \sqrt{\frac{2a}{\omega}} \ln \frac{\vartheta_{sm}}{\vartheta_{xm}}$  (5)

- Maksymalna gęstość strumienia ciepła:  $\dot{q}_m = \vartheta_{sm} \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c_p \cdot \omega}$  (6)

-Współczynnik przyswajania ciepła  $s_w = 2,507 \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c_p \cdot \nu}$  (7)

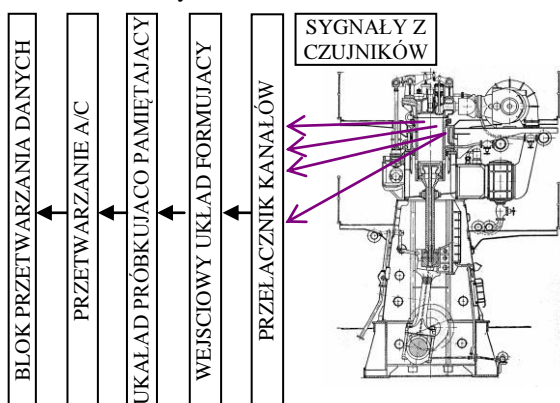
Ze wzorów (1,6 i 7) wynika, że wraz ze wzrostem maksymalnej amplitudy temperatury rośnie wartość naprężeń (tab.1), rośnie gęstość strumienia ciepła i maleje wartość współczynnika przyswajania ciepła w np. tulei cylindrycznej. Dodatkowo po stronie omywanej gazami rosną naprężenia ściskające a po stronie chłodzącej naprężenia rozciągające. Zmiany tych naprężeń można badać za pomocą emisji akustycznej (EA). W związku z tym w następnym rozdziale przedstawiona będzie możliwość wykorzystania piezoelektrycznych czujników do określania zmian  $\vartheta_{sm}$ .

#### 4. Przydatność emisji akustycznej

Jak przedstawiono w pracach [2,3 i 7] emisja akustyczna jest efektywną metodą monitorowania pracy maszyn poruszających się ruchem posuwisto – zwrotnym. Metoda EA należy do grup metod nieniszczących i jest obecnie jedną z najbardziej efektywnych metod monitorowania wyprzedzającego powstanie uszkodzeń elementów konstrukcyjnych w silnikach spalinowych jak:

- pęknięcia tulei cylindrycznej (podczas zacieraania tłoka w tulei),
- pęknięcia pierścieni tłokowych uszczelniających i zgarniających,
- zatarcie tłoka w tulei.

W celu wyznaczenia głębokości przenikania fal temperaturowych należy zamocować kilka torów pomiarowych z czujnikami piezoelektrycznymi w okolicach ZW rys.3.



Rys.3. Model blokowy torów pomiarowych tulei cylindrycznej umieszczonych w okolicach ZW silnika tłokowego

Dodatkowo należy wykorzystać tzw. „sztuczne” źródło EA jako wzorzec do badań. „Sztuczne” źródło EA należy umieścić w pobliżu czujników i tak skalibrować, aby czujniki podczas pracy silnika

jako poziom referencyjny odczytywały głębokość przenikania fal temperaturowych jako odległość, na której amplituda fali zmniejszy się np. do 0,01 na

powierzchni ciała, czyli  $x = 6,51 \cdot \sqrt{\frac{2a}{\omega}}$ . Ten

poziom należy ustalić jako referencyjny i gdy nastąpi jego przekroczenie świadczyć to będzie o wzroście maksymalnej amplitudy temperatury  $\vartheta_{sm}$  co jest związane np. z zablokowaniem pierścienia tłokowego.

Taki sposób interpretacji wyników pomiarów EA umożliwi diagnozowanie i prognozowanie procesu zmian stanu technicznego warstw wierzchnich spowodowanych wzrostem naprężeń dodatkowych (tab.1) i gęstością strumienia ciepła podczas eksploatacji silnika.

Jednak zaproponowany sposób ustalenia wzrostu maksymalnej amplitudy temperatury  $\vartheta_{sm}$  wiąże się z prawdopodobieństwem sformułowania błędnej diagnozy. W związku z tym należy np. na podstawie modelu topologicznego określić prawdopodobieństwa zdatności poszczególnych torów pomiarowych EA oraz w jakim stopniu wpływają one na ocenę wzrostu  $\vartheta_{sm}$ .

#### 5. Wnioski końcowe

W pracy przedstawiona została metoda wyznaczenia maksymalnej amplitudy temperatury warstwy wierzchniej elementów zespołu TPC najbardziej narażonych na uszkodzenie. Zaproponowana metoda dotyczy pomiaru głębokości rozchodzenia się fal termicznych za pomocą torów pomiarowych emisji akustycznej.

Dzięki monitorowaniu zmian maksymalnej amplitudy temperatury warstwy wierzchniej można analizować naprężenia w materiale (1) jak i jego zachowanie przy zmiennych obciążeniach cieplnych (7).

#### Nomenclature/Skróty i oznaczenia

EA	Emisja akustyczna
TPC	Tłok-pierścienie tłokowe-tuleja cylindryczna
WW	Warstwa wierzchnia
ZW	Zwrot wewnętrzny
ZZ	Zwrot zewnętrzny
a	dyfuzyjność cieplna

$c_p$	ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu
$s_w$	Współczynnik przyswajania ciepła
$\vartheta_{sm}$	Maksymalna amplituda temperatury
$\lambda$	Współczynnik przewodzenia ciepła
x	Głębokość przenikania fal temperaturowych

#### Bibliography/Literatura

- [1] R.Brun, Szybkobieżne silniki wysokoprężne. WKiŁ, Warszawa 1973.
- [2] M EL Ghamry., L.R Reuben and J.A Steel., The Development of Automate pattern Recognition and Statiscal Feateres Isolation Technique for Diagnostics of Reciprocating Machinery Faults using Acoustic Emission., Mechanical Systems and Signals Processing, 17,805-823, 2003.
- [3] J.D Gill., R.L Rauben., M. Scaife, E.R Bron ., J.a Steel., Detection of Diesel Engine Faults using Acoustic Emission., Proc. 2 Conference. Planned Maitenance, Reliability and Quality, 2-3 April, 1,57-61, Oxford, 1998.

- 
- [4] M.Hebda, A.Wachal., Trybologia, WNT, Warszawa 1980
- [5] E.Kostowski, Przepływ ciepła, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2006
- [6] A.Niewczas, Trwałość zespołu tłok-pierścienie tłokowe-cylinder silnika spalinowego, WNT, Warszawa 1998
- [7] P.Nivesrangsan., C.Cochrone.,J. A. Steel.,R. L.Rouben.,AE Mapping of engines for spatially lacated time series.,Proc. 25 European Conference on Acoustic emission testing.,EWGAAE.,1151-1158.,Praque 2002.
- [8] W.Pudlik, Wymiana i wymienniki ciepła, Wydawnictwo Politechnik Gdańskiej, Gdańsk 1980
- [9] W.S.Semenow, Teplonażarzenność i dołgowieczność cylindroporszniewej grupy sudowych dizielej, Moskwa, Transport 1977
- [10] R.Smolko, System badań i kontroli oleju obiegowego okrętowych silników spalinowych. Wydawnictwo Wewnętrzne Instytutu Morskiego, Gdańsk 1996
- [11] Wiśniewski S.: Obciążenia cieplne silników tłokowych. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1972.
- [12] Wiśniewski St., Wiśniewski T.,S., Wymiana ciepła, WNT 2009
- [13] Włodarski J.K., Tłokowe silniki spalinowe – procesy trybologiczne. WKŁ, Warszawa 1982

Mr Bzura Piotr, DEng. – lecturer in the Faculty of Ocean Engineering and Ship Technology Gdansk University of Technology

*Dr inż. Piotr Bzura – adiunkt Politechniki Gdańskiej na Wydziale Oceanotechniki i Okrętownictwa.*

