

Grzegorz KUBICA

WPLYW WARUNKÓW OBCIĄŻENIA SILNIKA NA TEMPERATURĘ ŚCIAN KOMORY SPALANIA

Streszczenie. Celem prowadzonych badań było wyznaczenie temperatury ścian komory spalania, w zależności od warunków obciążenia silnika. Do realizacji tego celu zastosowano nową metodę, polegającą na określaniu rzeczywistej temperatury elementu komory spalania w czasie pracy silnika, na podstawie zarejestrowanej krzywej stygnięcia, po wyłączeniu silnika. Prezentowana metoda bazuje na standardowym systemie pomiaru i akwizycji danych bez konieczności wykonywania prac adaptacyjnych silnika. Wstępne pomiary wskazują na dużą uniwersalność jej zastosowania, co jest znaczącym atutem tego rozwiązania, ponieważ bezpośredni pomiar temperatury wewnątrz komory spalania, w czasie pracy silnika jest możliwy jedynie na przystosowanych silnikach badawczych, wyposażonych w zaawansowane, bezprzewodowe układy pomiarowe.

AN INFLUENCE OF LOAD ON TEMPERATURE OF COMBUSTION CHAMBER WALLS IN SI ENGINE

Summary. The determine of combustion chamber walls in depend of engine load was the main aim of the research leaded. To achieve that goal were used the new method of determining of real wall temperature during engine run, upon registered colling down curve after engine stop. The presented method is based on standard temperature measurement with thermocouple & DAQ. The engine adaptation is unnecessary. The preliminary measurements showing the application very universal. It is significant advantage, because the current control of combustion chamber walls temperature is possible only in examination engine well equipped with advanced wireless measurement systems.

1. WPROWADZENIE

Pełny obraz zjawisk zachodzących podczas spalania paliwa w silniku spalinowym wymaga również przedstawienia tych wielkości, których bezpośredni pomiar jest niemożliwy; są to: stopień wypalenia ładunku, ilość wydzielonej energii, temperatura gazów w komorze spalania. W celu określenia przebiegu zmian tych wielkości (w funkcji kąta OWK lub w funkcji czasu), wykonuje się obliczenia na podstawie matematycznego modelu spalania. Jednym z problemów, który pojawia się przy realizacji obliczeń jest przyjęcie wystarczająco dokładnych wartości parametrów, kształtujących wymianę energii pomiędzy ładunkiem w cylindrze a otaczającymi go ściankami komory spalania. Bezpośredni pomiar jest szczególnie utrudniony ze względu na posuwisto-zwrotny ruch tłoka i warunki panujące wewnątrz komory spalania. Ponadto, wymaga on, specjalistycznych systemów pomiarowych

i ingerencji w konstrukcję silnika [5,7]. W konsekwencji najczęściej przyjmuje się wartości przybliżone, opracowane na podstawie danych literaturowych i wyników badań uzyskanych dla podobnych silników. Prezentowana metoda daje natomiast możliwość określenia rzeczywistej temperatury ścian wewnątrz komory spalania, w czasie pracy badanego silnika. Dodatkowymi zaletami tej metody są:

- klasyczny system pomiaru temperatury z użyciem termopary,
- uniwersalność, pozwalająca na wykonywanie pomiarów w dowolnym silniku ZI,
- brak konieczności ingerencji w konstrukcję silnika.

2. ELEMENTARNA WYMIANA CIEPŁA

Elementarna wymiana ciepła pomiędzy czynnikiem roboczym a ściankami przestrzeni roboczej jest opisana zależnością Newtona [1]:

$$dQ_w = \omega^{-1} * \alpha(\varphi) * A(\varphi) * [T(\varphi) - T_{sc}] \quad d\varphi \quad (1)$$

gdzie:

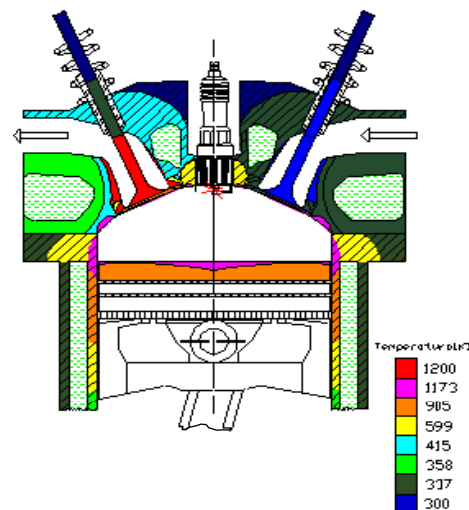
ω - prędkość kątowna wału korbowego;

$\alpha(\varphi)$ - współczynnik wymiany ciepła, zależny m.in. od: ciśnienia, napięcia termicznego, wymiarów i prędkości tłoka oraz materiału z jakiego wykonane są elementy;

$A(\varphi)$ - funkcja powierzchni ścian przestrzeni roboczej;

T_{sc} - temperatura ścian komory spalania.

Wartość funkcji określającej średnią temperaturę ścian zmienia się w ciągu całego obiegu zaledwie o kilka stopni, dlatego wielu autorów prac na ten temat proponuje przyjąć stałą wartość temperatury ścianki cylindra. W przedstawionej zależności (1) warunki termiczne zdeterminowane są przez współczynnik wymiany ciepła $\alpha(\varphi)$ i temperaturę ścianek. Ten drugi parametr, w rzeczywistości składa się z udziałów temperatur ścian poszczególnych elementów (denka tłoka, głowicy nad tłokiem, tulei cylindra, zaworów), ponieważ ich temperatura nie jest jednakowa (rys. 1). W obliczeniach modelowych natomiast, wprowadza się wartość średnią temperatury ścian, szczególnie, w przypadku gdy brakuje dokładnych danych.

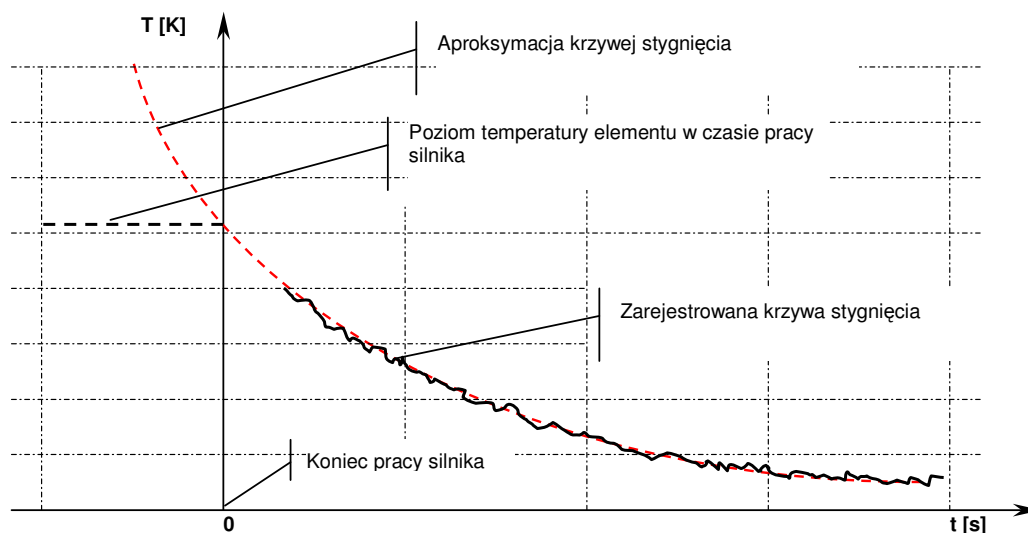


Rys. 1. Rozkład pól temperatur ścianek komory spalania w czasie pracy silnika na biegu jałowym [2]

Fig. 1. Walls chamber temperature profile in engine working on idle [2]

3. OPIS STOSOWANEJ METODY I TECHNIKA WYKONYWANIA POMIARÓW

W prezentowanej metodzie wyznacza się temperaturę danego elementu komory spalania na podstawie zmian temperatury w czasie stygnięcia elementu, po wyłączeniu silnika. W praktyce polega to na aproksymacji zarejestrowanego fragmentu tzw. krzywej stygnięcia i ekstrapolacji do punktu 0, w którym wyłączono silnik (rys. 2).



Rys. 2. Schemat wyznaczania temperatury ścianki metodą stygnięcia

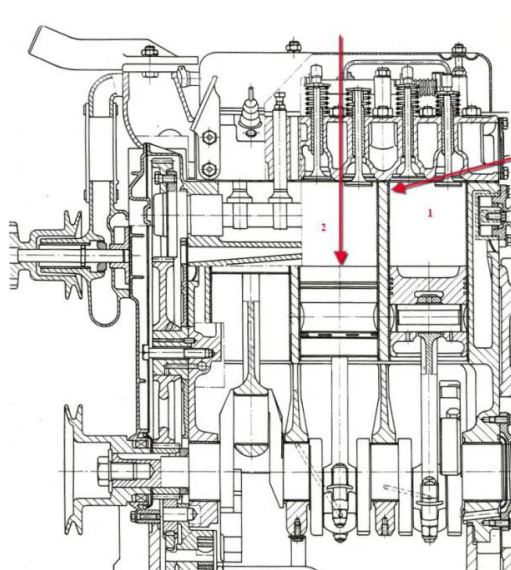
Fig. 2. A scheme of wall temperature appointing with cooling down method

Badania przeprowadzono na silniku gazowym PERKINS AD3.152G zasilanym LPG, osadzonym na hamowni silnikowej (rys. 3). Technika wykonywania pomiarów polegała na tym, że pracujący, w stanie ustalonym silnik, wyłączano a następnie wprowadzano do wnętrza komory spalania termoparę typu K przez otwarty zawór dolotowy lub przez otwór po wykręceniu świecy zapłonowej (rys. 4).



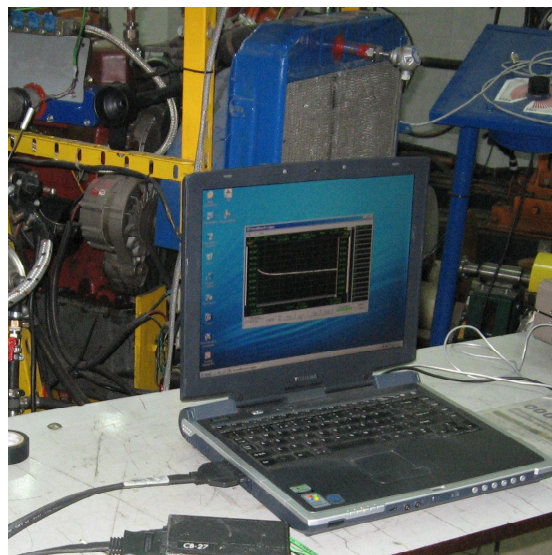
Rys. 3. Silnik PERKINS AD3.152G na hamowni silnikowej

Fig. 3. PERKINS AD3.152G engine on bench stand



Rys. 5. Przekrój silnika z zaznaczonymi punktami pomiaru temperatury [6]

Fig. 5. An engine section with marked points of temperature control [6]



Rys. 4. Widok stanowiska pomiarowego
Fig. 4. A view of measuring stand

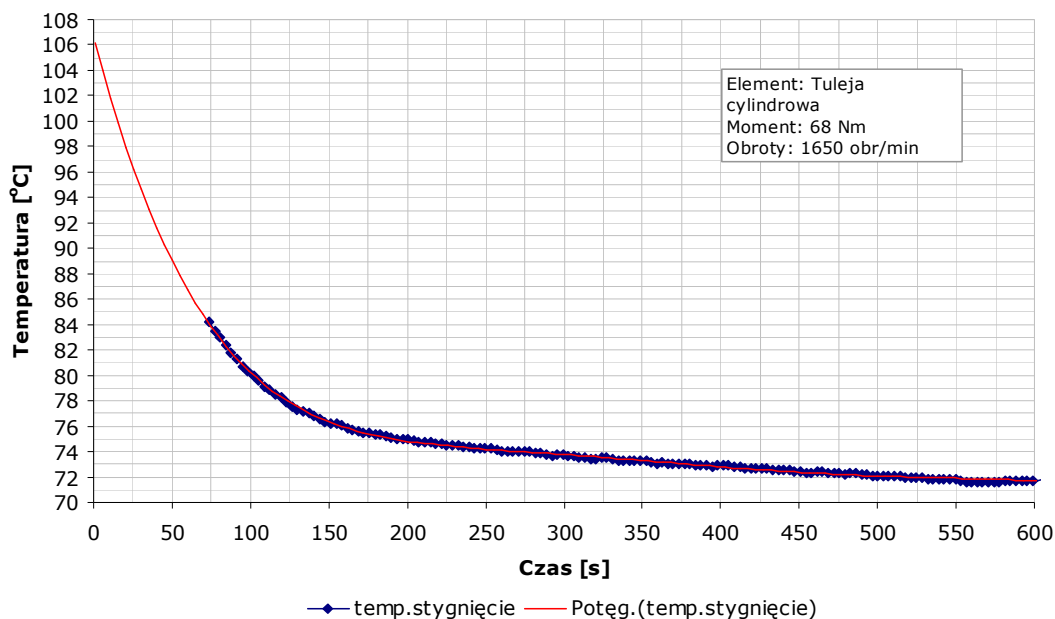
W trakcie pomiarów rejestrowano bieżące parametry pracy silnika na hamowni silnikowej (moc, moment obrotowy, prędkość, itp.), a także temperaturę cieczy chłodzącej, również po unieruchomieniu silnika. W momencie zatrzymania pracy silnika uruchamiano system pomiaru i rejestracji temperatury stygnięcia (rys. 5). Pomiar stygnięcia elementu kontynuowano przez kilkanaście minut, tak aby zarejestrować wystarczająco długi fragment krzywej stygnięcia.

4. WYZNACZANIE TEMPERATURY ŚCIAN BADANYCH ELEMENTÓW

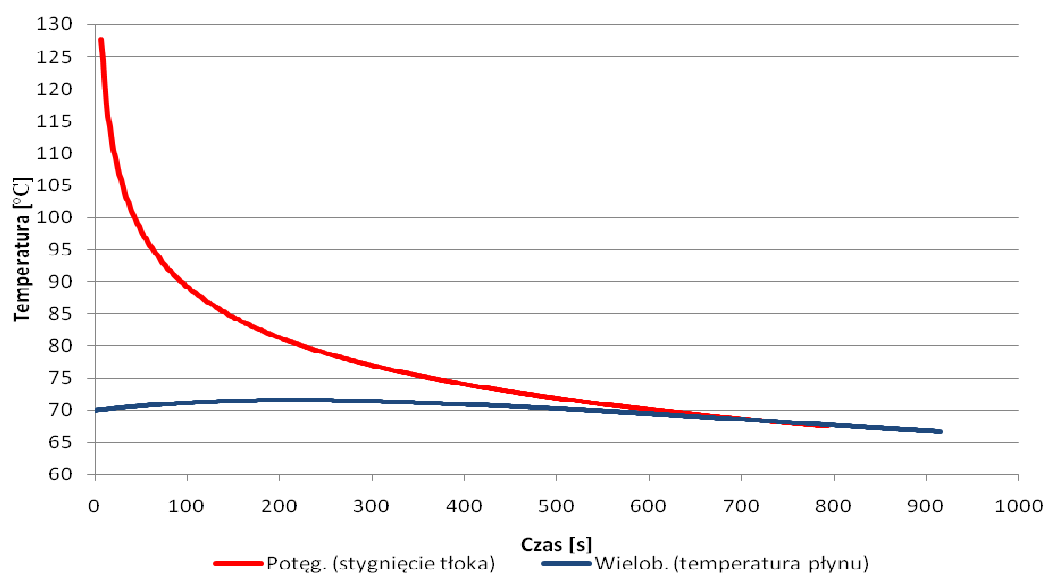
Wyniki pomiaru temperatur badanych elementów silnika w czasie stygnięcia, zarejestrowane w czasie badań hamownianych, przedstawiono na wykresach i dokonano ich aproksymacji w funkcji czasu. Interpolując przebieg funkcji do punktu „0” – wyłączenie silnika (rys. 6) otrzymano poszukiwaną wartość temperatury badanego elementu, w danych warunkach pracy. Najwyższe wartości współczynnika korelacji uzyskuje się dla funkcji potęgowej.

Następnie porównano uzyskane przebiegi stygnięcia z temperaturą cieczy chłodzącej (rys.7). Dla cieczy chłodzącej obserwuje się niewielki wzrost temperatury po wyłączeniu silnika, co jest spowodowane zatrzymaniem pompy wymuszającej obieg. Na skutek przepływu energii od elementów komory spalania do cieczy chłodzącej obydwa przebiegi są zbliżone i po upływie ok. 10 min dochodzi do wyrównania temperatur.

Wyniki dla wykonanego zakresu badań zestawiono w formie tabelarycznej (tab.1), a na kolejnym wykresie przedstawiono wszystkie opracowane krzywe stygnięcia (rys.8).



Rys. 6. Wyniki pomiaru krzywej stygnięcia i funkcja aproksymująca dla tulei cylindrowej
Fig. 6. The registered cooling down curve and approximation for cylinder wall



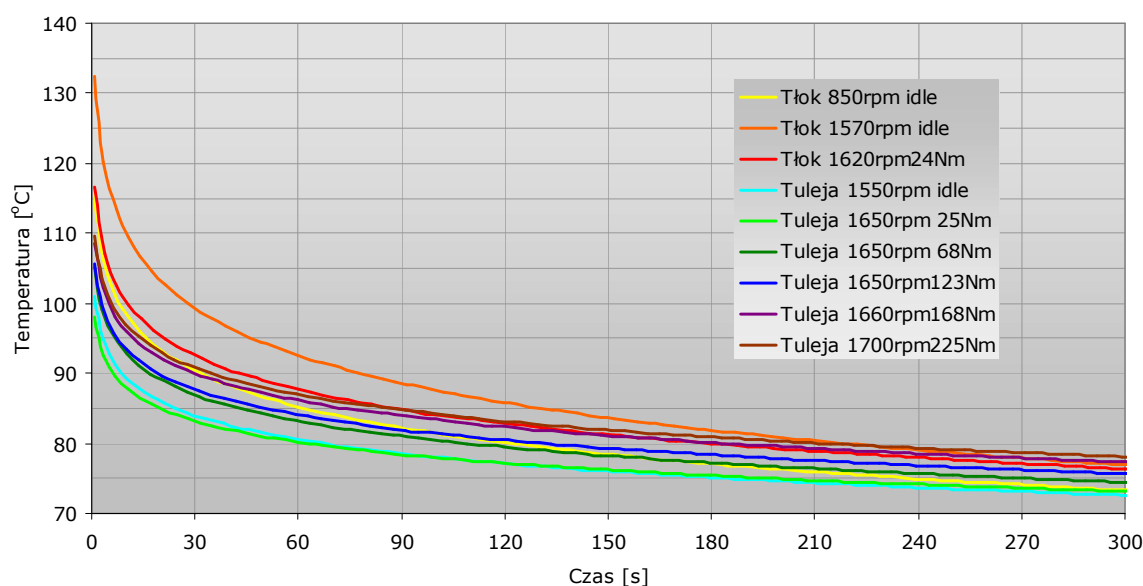
Rys. 7. Wykres temperatury tłoka i temperatury płynu chłodzącego dla prędkości obrotowej 1570 obr/min i przy obciążeniu 0 Nm [5]
Fig. 7. The profiles of temperature of piston and temperature of cooling water; speed -1570 rpm, load 0 Nm.

Powyższe wyniki odnosząc do poziomu temperatur elementów komory spalania, które są prezentowane w literaturze [4,5], można zauważyć, że wartości wyznaczone metodą stygnięcia są niższe. Różnice te mogą być spowodowane niedoskonałościami metody aproksymacji wyników oraz umiejscowieniem i bezwładnością termopary pomiarowej.

Tabela 1

Zestawienie wyników uzyskanych w całym zakresie badań

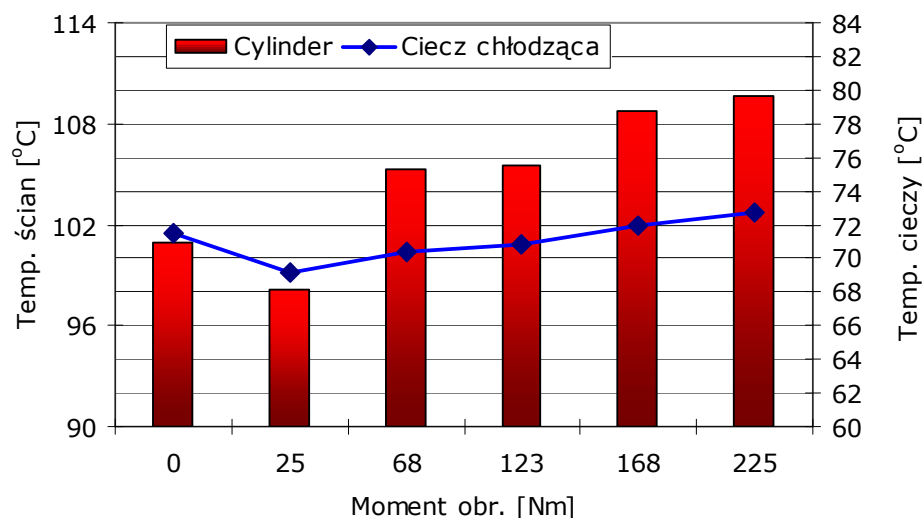
Element	Obroty [rpm]	Obciążenie [Nm]	Temp sc. [°C]	Temp cieczy [°C]
Tłok	850	0	115,6	66,5
Tłok	1570	0	132,5	70,3
Tłok	1620	24	116,6	70,8
Tuleja	1550	0	100,9	71,5
Tuleja	1650	25	98,1	69,2
Tuleja	1650	68	105,3	70,4
Tuleja	1650	123	105,5	70,8
Tuleja	1660	168	108,7	72
Tuleja	1700	225	109,7	72,7



Rys. 8. Zestawienie krzywych stygnięcia dla badanych elementów w różnych warunkach pracy silnika
 Fig. 8. The cooling down curves set for elements tested in variable work conditions of engine

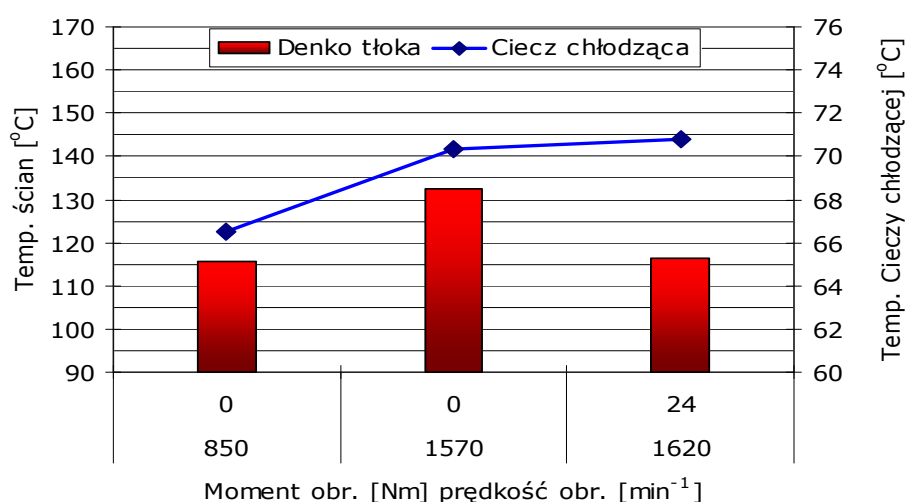
5. WPŁYW STOPNIA OBCIĄŻENIA SILNIKA NA POZIOM TEMPERATURY

Analizując wpływ obciążenia silnika na temperaturę ścian komory spalania uzyskane wyniki przedstawiono w postaci wykresu (rys. 9) W przypadku badanego silnika widoczna jest ścisła korelacja pomiędzy temperaturą tulei cylindrowej a temperaturą cieczy chłodzącej. Poziom temperatur wzrasta wraz z rozwijającym momentem obrotowym. Wyjątkiem jest stan pracy bez obciążenia, gdzie obserwuje się podwyższoną temperaturę. Podobną sytuację zaobserwowano przy badaniach temperatury denka tłoka (rys.10). Przy obciążeniu silnika momentem 24 Nm temperatura tłoka jest niższa niż przy pracy bez obciążenia i jest porównywalna z temperaturą wyznaczoną przy pracy na biegu jałowym.



Rys. 9. Wpływ obciążenia silnika na poziom temperatur: tulei cylindra i cieczy chłodzącej

Fig. 9. An influence of engine load on temperature of cylinder wall and cooling water



Rys. 10. Wpływ warunków pracy silnika na poziom temperatur: denka tłoka i cieczy chłodzącej

Fig. 10. An influence of work conditions of engine on temperature of piston crown and cooling water

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Podsumowując przebieg badań można stwierdzić że, dzięki zastosowaniu metody, której koncepcję i założenia sformułowano i przedstawiono w niniejszym artykule, możliwe jest wyznaczenie temperatury ścianek dowolnego elementu komory spalania w czasie pracy silnika, przy użyciu prostego systemu pomiarowego.

Zastosowana metoda badawcza jest uniwersalna w zakresie silników ZI. Badany silnik może być usytuowany zarówno na hamowni silnikowej, jak i w pojeździe, badanym na hamowni podwoziowej.

Analizując opracowane wyniki można sformułować następujące wnioski:

1. Wyznaczona temperatura tulei cylindra w badanym silniku wzrasta wraz z obciążeniem silnika od 98°C przy wartości $M_o=25$ Nm, do ~110°C przy pełnym obciążeniu ($M_o=225$ Nm). Na biegu jałowym temperatura wynosiła 100,9°C.
2. Obserwując zarejestrowane krzywe stygnięcia i temperaturę cieczy chłodzącej widoczna jest zbieżność tych dwóch parametrów. Całkowite zrównanie obserwuje się w przypadku tulei, po upływie ok. 11 min.
3. W przypadku denka tłoka jego temperatura, w tych samych warunkach pracy silnika, jest wyższa niż dla tulei cylindrowej o 15÷30°C. Przyczyną tego stanu są utrudnione warunki odprowadzania ciepła.
4. Do aproksymowania funkcji opisującej krzywą stygnięcia wykorzystano funkcję potęgową, $y=a^{-bx}+c$. Dla takiej postaci funkcji uzyskano najlepszą korelację.
5. Przeprowadzone badania miały (w pierwszym rzędzie) na celu sprawdzenie możliwości wykorzystania metody wyznaczania temperatury ścian komory spalania na podstawie krzywej stygnięcia. Wyniki eksperymentu potwierdziły postawioną tezę i ukazały możliwość jej zastosowania w szerokim zakresie.

Bibliografia

1. Flekiewicz M., Kubica G.: Problemy prawidłowego doboru parametrów wymiany ciepła w silniku gazowym. Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej, z. 25, Mechanika, Częstochowa 2003.
2. Pijaj M.: Wpływ rodzaju paliwa na obciążenia cieplne komory spalania. Praca dyplomowa magisterska, Politechnika Śląska, Katowice 2005.
3. Szargut J.: Termodynamika, PWN, Warszawa 1980.
4. Wajand J. A, Wajand J. T.: Tłokowe silniki spalinowe średnio- i szybkoobrotowe. WNT, Warszawa 2005.
5. Ward D. M.: Engine piston temperature measurements for thermal loading using a Fiber Bragg Grating (FBG) embedded into the piston surface. Master thesis, University of Wisconsin, Madison WI (US) 2004.
6. Zych J.: Wpływ warunków pracy silnika ZI na temperaturę ścian wybranych elementów komory spalania. Praca dyplomowa magisterska, Politechnika Śląska, Katowice 2009.
7. Materiały firmy IR TELEMETRICS – Piston Temperature Measurement, Wireless Telemetry Systems, <http://www.irtelemetrics.com/contact/index.html>, Houghton MI (US) 2009.
8. Materiały firmy NATIONAL INSTRUMENTS – The Measurement and Automation Catalog, Austin TX, U.S. 2002.

Recenzent: Dr hab. inż. Sławomir Luft,
prof. nzw. Politechniki Radomskiej

Praca wykonana w ramach: BW-479/RT2/2009